

# 电子工业技术词典

超 声

国防工业出版社

R  
73.6072  
174.16

# 电子工业技术词典

## 超 声

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

310.5/22



## 内 容 简 介

《电子工业技术词典》是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》(试用本)的基础上作了较大修改和增补而编写的。本《词典》是一本为广大工农兵和干部提供的深入浅出、简明实用的工具书。它也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌、扩大知识面时参考。

本《词典》共有三十四章。正文中各词汇后附有英文对照,书末附有英文索引,合订本中还附有汉字笔画索引。在出版合订本之前,将先分册出版。各分册所包括的章节内容和出版先后次序,将视具体情况而定。

本分册是《词典》第三十章超声的内容,它包括:超声物理基础,超声处理,超声检测与超声医学,声成像与声全息,微波超声等五节。

## 电子工业技术词典

### 超 声

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证书字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 4<sup>7</sup>/<sub>8</sub> 98千字

1977年1月第一版 1977年1月第一次印刷 印数:00,001—22,000册

统一书号:17034·29-28 定价:0.54元

## 前 言

《电子工业技术词典》是在无产阶级文化大革命伟大胜利的鼓舞下，在学习无产阶级专政理论的热潮中，在电子工业发展的新形势下出版的。它是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》（试用本）的基础上编写的。

原《词典》自发行以来，曾受到广大读者的欢迎，为宣传、普及、推广电子技术知识起了一定的作用。十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电子工业已有很大的发展，生产规模不断扩大，技术水平迅速提高，技术队伍日益壮大，电子技术的推广应用已引起国民经济各部门的重视，并在社会主义革命和社会主义建设中发挥出作用。目前，电子工业已成为国民经济的一个组成部分，电子工业战线的广大职工正在为实现第四届全国人民代表大会提出的宏伟目标而努力奋斗。为适应这一大好形势，更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务，我们对原《词典》进行了一次较大的修改和增补。内容力求反映七十年代电子技术的水平，释文尽量做到简明、通俗。目的是为了向要求对电子工业技术有一般常识的广大工农兵和干部提供一本实用的工具书；同时也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌和扩大知识面时参考。

本《词典》共分三十四章。其目录如下：

- |                 |             |
|-----------------|-------------|
| 一、电工基础；         | 二、基本电子线路；   |
| 三、网络分析与综合；      | 四、电波传播与天线；  |
| 五、信息论；          | 六、电阻、电容与电感； |
| 七、厚薄膜电路；        | 八、磁性材料与器件；  |
| 九、电子陶瓷与压电、铁电晶体； | 十、机电组件；     |
| 十一、电线与电缆；       | 十二、电子管；     |
| 十三、半导体；         | 十四、电源；      |
| 十五、其它元器件；       | 十六、通信；      |

32590

十七、广播与电视；

十九、导航；

二十一、电子对抗；

二十三、系统工程；

二十五、微波技术；

二十七、红外技术；

二十九、电声；

三十一、声纳；

三十三、电子测量技术与设备；

十八、雷达；

二十、自动控制与遥控、遥测；

二十二、电子计算机；

二十四、电子技术的其它应用；

二十六、显示技术；

二十八、激光技术；

三十、超声；

三十二、专用工艺设备与净化技术；

三十四、可靠性。

各章互有联系，并尽量避免章节间词汇的重复，故每章只有一定的系统性。正文前有章节和词汇目录，正文中各词汇后附有英文对照，最后附有汉字笔画索引与英文索引。本《词典》将先分册出版，各分册所包含的章节内容和出版先后次序将视具体情况而定。各分册无汉字笔画索引。

本《词典》的编写工作，自始至终是在毛主席革命路线的指引下，在党的领导下进行的。贯彻了“独立自主，自力更生”的伟大方针，坚持了群众路线，实行了工人、干部、科技人员和生产、科研、教学两个三结合，以及理论联系实际的原则。《电子工业技术词典》本身就是广大群众集体智慧的结晶。它的编写过程也反映了无产阶级文化大革命后我国出版战线上的新气象。

由于我们水平有限，加上时间仓促，虽然作了很大努力，但《词典》中还可能存在不少错误和不妥之处，恳请广大读者及时批评指正。

《电子工业技术词典》编辑委员会

一九七五年十月一日

# 目 录

## 一、超声物理基础

超声·····	30-1	振动方式·····	30-5
传声介质·····	30-2	体积胀缩振动·····	30-5
各向同性(传声)介质·····	30-2	长度伸缩振动·····	30-5
各向异性(传声)介质·····	30-2	扭转振动·····	30-5
频散(传声)介质·····	30-3	体波·····	30-5
非频散(传声)介质·····	30-3	表面声波·····	30-5
声速度·····	30-3	纵波·····	30-6
相速度·····	30-3	横波·····	30-6
群速度·····	30-3	胀缩波·····	30-6
无限大固体中的纵波声速·····	30-3	畸变波·····	30-6
细棒中的纵波声速·····	30-3	切变波·····	30-6
声吸收·····	30-3	弯曲波·····	30-6
声衰减·····	30-3	扭转波·····	30-6
辐射声压·····	30-4	准纵波·····	30-6
机电类比·····	30-4	准横波·····	30-6
声电类比·····	30-4	纯波·····	30-6
声导纳·····	30-4	板波·····	30-6
声负载·····	30-4	兰姆波·····	30-6
声耦合·····	30-4	瑞利波·····	30-7
临界角·····	30-4	乐甫波·····	30-7
第一临界角·····	30-4	声电波(B-G波)·····	30-7
第二临界角·····	30-4	斯顿莱波·····	30-7
指向性·····	30-4	楔波·····	30-7
半扩散角·····	30-4	漏表面波·····	30-7
主瓣·····	30-5	非线性声效应·····	30-8
旁瓣·····	30-5	声子·····	30-8
多卜勒效应·····	30-5	超声直接放大·····	30-8

## 二、超 声 处 理

超声处理·····	30-9	高频发电机·····	30-9
超声发生器·····	30-9	超声换能器·····	30-9
超声电源·····	30-9	磁致伸缩换能器·····	30-10
频率跟踪式超声发生器·····	30-9	叠片式换能器·····	30-10

- 单窗换能器 .....30-10  
 多窗换能器 .....30-10  
 蜂窝结构换能器 .....30-10  
 浸没式换能器 .....30-10  
 压电换能器 .....30-10  
 夹心式换能器 .....30-11  
 镶嵌式换能器 .....30-11  
 静电换能器 .....30-11  
 超声换能器材料 .....30-11  
 偏磁电流 .....30-11  
 拾振器 .....30-11  
 反馈换能器 .....30-12  
 反馈片 .....30-12  
 换能器输入阻抗 .....30-12  
 箱制阻抗 .....30-12  
 静态阻抗 .....30-12  
 动生阻抗 .....30-12  
 阻抗圆 .....30-12  
 换能器输入导纳 .....30-12  
 箱制导纳 .....30-12  
 静态导纳 .....30-12  
 动生导纳 .....30-12  
 导纳圆 .....30-12  
 机械品质因数 .....30-12  
 机电效率 .....30-12  
 机声效率 .....30-13  
 电声效率 .....30-13  
 流体动力型换能器 .....30-13  
 簧片哨 .....30-13  
 空腔哨 .....30-13  
 旋笛 .....30-13  
 涡旋哨 .....30-13  
 圆板哨 .....30-13  
 变幅杆 .....30-13  
 聚能器 .....30-13  
 面积系数 .....30-14  
 形状因数 .....30-14  
 圆锥形变幅杆 .....30-14  
 指数形变幅杆 .....30-14  
 阶梯形变幅杆 .....30-14  
 悬链形变幅杆 .....30-15  
 高斯形变幅杆 .....30-15  
 傅里叶形变幅杆 .....30-15  
 复合形变幅杆 .....30-15  
 耦合杆 .....30-15  
 超声振动系统 .....30-15  
 超声功率计 .....30-15  
 声压计 .....30-16  
 超声效应 .....30-16  
 超声机械效应 .....30-16  
 超声光效应 .....30-16  
 超声电效应 .....30-16  
 超声热效应 .....30-16  
 超声化学效应 .....30-16  
 超声生物效应 .....30-16  
 声空化 .....30-16  
 空化气泡 .....30-16  
 空化核 .....30-16  
 空化阈 .....30-16  
 超声清洗 .....30-17  
 超声加工 .....30-17  
 超声钻孔 .....30-18  
 超声切割 .....30-18  
 超声研磨 .....30-18  
 超声与机械联合加工 .....30-18  
 超声与电火花联合加工 .....30-18  
 超声与电解联合加工 .....30-18  
 磨料 .....30-18  
 磨蚀液 .....30-19  
 超声加工生产率 .....30-19  
 超声加工速度 .....30-19  
 超声加工工具磨损率 .....30-19  
 超声焊接 .....30-19  
 超声点焊 .....30-19  
 超声缝焊 .....30-19  
 超声环焊 .....30-19

超声多点焊 .....	30-19	超声萃取 .....	30-20
超声热压焊 .....	30-20	超声粉碎 .....	30-20
焊头 .....	30-20	超声乳化 .....	30-21
声头 .....	30-20	超声金属成形 .....	30-21
超声缝纫 .....	30-20	超声雾化 .....	30-21
超声搪锡 .....	30-20	超声电镀 .....	30-21
超声钎焊 .....	30-20	超声浸渍 .....	30-21
超声波峰焊 .....	30-20	超声疲劳测试 .....	30-21
超声冶金 .....	30-20	超声处理种子 .....	30-21
超声凝聚 .....	30-20		

### 三、超声检测与超声医学

超声检测 .....	30-22	可变斜角探头 .....	30-26
超声探伤 .....	30-22	表面波探头 .....	30-26
脉冲反射法 .....	30-22	聚焦探头 .....	30-26
穿透法 .....	30-23	双晶片探头 .....	30-26
共振法 .....	30-23	轮胎式探头 .....	30-26
声阻法 .....	30-23	超声探伤仪 .....	30-27
单探头探伤法 .....	30-23	自动报警器 .....	30-27
双探头探伤法 .....	30-23	超声多卜勒检测系统 .....	30-27
单向探查 .....	30-23	穿透力 .....	30-27
双向探查 .....	30-23	探伤灵敏度 .....	30-27
垂直探伤法 .....	30-23	分辨率 .....	30-28
直探法 .....	30-24	纵向分辨率 .....	30-28
斜角探伤法 .....	30-24	横向分辨率 .....	30-28
斜探法 .....	30-24	盲区 .....	30-28
接触法 .....	30-24	抑制 .....	30-28
水浸法 .....	30-24	阻塞 .....	30-28
纵波探伤法 .....	30-24	深度补偿 .....	30-28
横波探伤法 .....	30-24	距离振幅补偿 .....	30-28
表面波探伤法 .....	30-24	耦合剂 .....	30-28
板波探伤法 .....	30-24	探伤面 .....	30-29
三角形探伤法 .....	30-24	扫查 .....	30-29
自动探伤 .....	30-25	探伤图形 .....	30-29
探头 .....	30-25	射频显示 .....	30-29
直探头 .....	30-25	视频显示 .....	30-29
斜探头 .....	30-25	A型显示 .....	30-29
水浸探头 .....	30-26	B型显示 .....	30-30



P 型 (PPI 型) 显示	30-30	声发射源	30-33
BP 型显示	30-30	声发射信号	30-33
复合显示	30-30	连续发射	30-33
M 型显示	30-30	突发发射	30-33
回声图	30-30	声发射发生率曲线	30-33
声象图	30-30	声发射源的位置标定	30-34
超声心动图	30-30	声发射不可逆效应 (凯塞尔效应)	30-34
发射脉冲	30-30	凯塞尔效应	30-34
伤波	30-30	声发射检测系统	30-34
缺陷反射波	30-30	声发射监听系统	30-35
底波	30-30	超声测厚	30-35
底面反射波	30-30	超声测硬度	30-35
干扰反射波	30-31	超声测流速	30-36
假反射波	30-31	超声测液位	30-36
楔内反射波	30-31	超声测粘度	30-36
界面反射波	30-31	超声测温度	30-36
迟到反射波	30-31	超声医学	30-36
比较试块	30-31	超声诊断	30-36
标准试块	30-31	超声治疗	30-37
人工伤	30-31	超声外科	30-37
人为缺陷	30-31	超声透入	30-37
AVG (DGS) 图	30-31	脉冲反射式超声诊断仪	30-37
声发射	30-32	幅度调制型 (A 型) 超声诊断仪	30-37
声发射发生率	30-32	超声切面显象仪 (辉度调制型)	30-38
声发射事件	30-32	超声多卜勒诊断仪	30-38
声发射累积总数	30-32	超声心动图仪	30-38
声发射振幅	30-33	超声治疗机	30-38
声发射频谱	30-33	医用超声雾化器	30-38

#### 四、声成象与声全息

声成象	30-39	声全息图的重建	30-41
声全息	30-39	共轭象	30-41
物波	30-40	液面声全息	30-41
参考波	30-41	布阵声全息	30-42
声全息图	30-41	机械扫描声全息	30-42
振幅全息图	30-41	电子束扫描声全息	30-42
相位全息图	30-41	激光束扫描声全息	30-42

地震全息 .....	30-43	声透镜 .....	30-44
布拉格衍射声成象 .....	30-43	固体声透镜 .....	30-44
超声照相机 .....	30-43	液体声透镜 .....	30-44
超声显微镜 .....	30-43	声反射器 .....	30-44
声象差 .....	30-43	声聚焦器 .....	30-44
纵向畸变 .....	30-43	声孔径 .....	30-44
声电管 .....	30-43	声栅 .....	30-44
声象转换管 .....	30-44		

## 五、微波超声

微波超声 .....	30-45	表面声波带通滤波器 .....	30-52
表面声波技术 .....	30-45	表面声波脉冲压缩滤波器 .....	30-52
表面声波换能器 .....	30-46	反射阵列脉冲压缩器 .....	30-53
叉指换能器 .....	30-46	表面声波编码器 .....	30-53
双电极换能器 .....	30-47	表面声波振荡器 .....	30-54
双向换能器 .....	30-47	表面声波放大器 .....	30-54
单向换能器 .....	30-47	单片式放大器 .....	30-54
宽带换能器 .....	30-47	条带耦合式放大器 .....	30-54
频散换能器 .....	30-47	表面声波卷积器 .....	30-55
加权换能器 .....	30-48	表面声波相关器 .....	30-55
不等指长换能器 .....	30-48	表面声波移相器 .....	30-55
假指 .....	30-49	表面声波材料 .....	30-56
斜形换能器 .....	30-49	表面声波机电耦合系数 .....	30-56
表面声波 MOS 检测 (换能) 器 .....	30-49	表面声波器件的制造工艺 .....	30-57
等效电路模型 .....	30-49	体声波器件 .....	30-57
交叉场模型 .....	30-50	体声波换能器 .....	30-57
共线场模型 .....	30-50	体声波延迟线 .....	30-58
$\delta$ 函数模型 .....	30-50	固体块多次反射延迟线 .....	30-58
脉冲响应模型 .....	30-50	带状色散延迟线 .....	30-58
多条带耦合器 .....	30-50	声电效应 .....	30-59
反射阵列 .....	30-50	声电流 .....	30-59
表面声波波导 .....	30-51	声电畴 .....	30-60
薄膜波导 .....	30-51	声电振荡器 .....	30-60
地形波导 .....	30-51	声光效应 .....	30-60
三次行程回波 .....	30-51	拉曼-纳斯衍射 .....	30-61
次级效应 .....	30-52		
表面声波滤波器 .....	30-52		

布拉格衍射 .....	30-61	磁弹耦合 .....	30-62
声光调制器 .....	30-62	磁声耦合 .....	30-63
声光偏转器 .....	30-62	磁弹波 .....	30-63
声光腔倒空 .....	30-62	磁弹波延迟线 .....	30-63
声光介质 .....	30-62	声法拉第旋转 .....	30-63

## 一、超声物理基础

### 超声

ultrasound

声音是与人类生活紧密相联的一种自然现象。当声的频率高到超过人耳听觉的频率极限（根据大量调查，取整数 20000 赫）时，人们就觉察不出声的存在，因而称这种高频率的声为“超”声。

超声技术在生产、科研中，由于愈来愈显出了它的重要性而获得不断的发展。在这发展的过程中，对超声本身的特性，产生和接收超声的种种可能方法，超声在传播过程中的各种规律，以及对超声的多种可能用途和超声作用的基本原理等，都进行了研究探索，从而逐渐构成了一门独立的学科，称为超声学。

超声在工业、农业、国防、医药卫生、科学研究等方面有着很广泛的应用。例如，利用超声可以检查多种类型钢材、钢轨、高压容器、大小机械部件和金属焊缝等内部的裂缝、夹杂等等。这是一项应用相当广泛的非破坏检测的手段，它主要利用了超声对固体和液体（包括熔金属）的穿透性，同时利用了超声的方向性、反射性或衰减性等特性。把同样的原理推广到人体上，可以从体外来检查体内的某些疾病、器官动态或生理变化。利用超声振动形式的能量，可以进行一些具有一定特色的处理。例如，可以处理种子，促使提前发芽，细化喷油的雾粒，强化燃烧以及乳化油水等等。还可以洗净某些用其它方法难以清洗的零部件，如喷油嘴、长针孔、集成电路的基片、钟表零件等等，也可以清除毛刺、锈皮等。可以焊接金属材料（包括铝线、铝膜等）和焊接塑料。可以搪锡，特别

是对铝搪锡。可以对宝石、石英、陶瓷、硅片等硬脆材料打出圆形的或非圆形的孔，进行切割或研磨。可以对人体进行治疗和“开刀”。利用超声的某些传播特性，可以用来测量弹性模量、厚度、硬度、粘度、温度、液位、流速、井下地层结构等等。超声可以影响材料里传播的光，因此利用超声可以对光进行调制，已制成一些声光器件，用在激光技术中。超声，特别是较高频的超声，和物质内某些微观结构有相互作用，例如，和金属、半导体、超导体里的电子以及和铁磁体里的磁振子等等有相互作用，由此可以一方面利用超声来进一步认识这些微观结构的特性，一方面利用这些相互作用来扩大超声的用途。至于超声在海洋里的应用，如探测潜艇，由于其重要性和复杂性，已划分在独立了的水声学的范围。

在无线电技术中，超声也有许多用途，特别是由于近年来发展了表面声波技术，超声在无线电技术中的应用更加广泛和紧密。上述清洗、焊接、搪锡、切割以及其它如用超声改进合金质量等等作用，都已用于无线电工艺中，特别是用于集成电路的工艺中。超声更可用于直接制成电子学器件，对电信号进行处理。这是由于超声一般是利用电声换能器产生和接收的，电声换能器能把电信号转换为声信号，或把声信号转换为电信号。这样就使电信号在其经历中有一段时期以声信号的形式而存在，而声信号的行为，是由传声介质等的声学性能决定的，或者是可以用声学手段来控制的。于是最终由声信号转换成的电信号将在某个或某些方面不同于初始的电信号。比较直观的例子是可以把电信号

延迟,这是由于声速远小于电磁波的速度。利用超声还可以制作电信号的多种滤波器,如带通滤波器、匹配滤波器等,可以制作电信号的振荡器、相关器、编码器、译码器等,这在雷达、通讯、遥测、计算、信息处理等方面用途很大。在这些器件中,有用体声波或磁弹波的,频率可达约10千兆赫,但目前更多的是在试用表面声波,一个重要原因,是因为表面声波容易接触到及容易处理。在目前,表面声波的频率约从几十兆赫到一千多兆赫。

另一方面,电子学的发展,也促进了超声学的发展。超声学本是门边缘学科,同许多学科是相互渗透、相互联系的。它和电子学的联系更是相当密切。电子学理论和技术的发展都会丰富超声学的内容。一个明显的原因是,如上所述,超声的产生和接收一般都用电学的方法。另一方面,在应用原理上,在基础理论上,超声学也不断从电子学吸取养料。例如超声探伤和超声诊断是借用雷达的原理和技术而发展起来的。近年来,在发展微波超声(包括表面声波)的过程中,也有不少地方借用了微波和半导体的理论和技术。

“超声”是从“声”划分出来的,原来的划分依据,是人耳在频率方面的收听能力。但生产实践和科学实验说明,超声的主要应用,不在听觉方面,因此听到听不到已不是重要的尺度(当然,在某些应用上,仍要注意听的问题,例如为了免除噪声,或者为了避免查觉)。有些超声应用,并不受20000赫这个阈值的束缚,在阈值以上可用,在阈值以下也同样有用。所以,关于超声的最低频率值问题,从应用角度、技术角度看,不存在很明确的界限。至于超声的最高频限,目前也没有统一的界限。事实上,产生和接收高频超声的方法不断在进展,高频率的领域相应地不断在扩大。近几年来,已能在实验室内

初步产生 $10^{11} \sim 10^{12}$ 赫的超声。在发展的过程中,对超声频率的上限,曾经有过一些不同的划分建议,例如,有建议选为500兆赫,1000兆赫,或 $10^{12}$ 赫等,并有建议对 $10^{12}$ 赫以上的超声叫做特超声。这些建议在一定程度上反映了较高频超声在技术上、应用上、理论上的一定特殊性。因此可以从“超声”再划分出“微波超声”来,指频率在约300兆赫以上的超声,但对微波超声的频率上限,现在不作规定。

超声的应用不断在深入和发展,这些深入和发展对超声的基础研究不断地提出新的课题。超声处理中的不少应用项目,对其作用机理还没有足够了解或很不了解。对超声的某些基本特性还没有充分掌握,有些还没有可靠的测量手段。不少材料、工艺问题还需要完善或提高。还有宽广的新的应用和理论领域需要开辟。这些问题的不断解决,将不断促进超声应用的进一步发展。

#### 传声介质

sound bearing medium

传声介质是指能够传递声波的物质,也称媒质。由于声波是机械波,具有弹性的物质,包括各种气体、液体和固体,都可用作传声介质。传声介质有均匀的,不均匀的;有各向同性的,各向异性的;有频散的,非频散的。

#### 各向同性(传声)介质

isotropic (sound bearing) medium

各向同性(传声)介质是指声波在其中传播时,声波的各项性能不随传播方向而变的传声介质。气体、液体和非晶体都属于这类介质。

#### 各向异性(传声)介质

anisotropic (sound bearing) medium

各向异性(传声)介质是指声波在其中传播时,声波的各项性能随传播方向而改变的传声介质。单晶体属于这类介质。各向异

性和各向同性有时是可以转化的,例如通过极化或退极化,压电陶瓷可以是各向异性的或各向同性的。

### 频散(传声)介质

dispersive (sound bearing) medium

频散(传声)介质是指声波在其中传播时,它的传播速度随它的频率而变化的传声介质。传声介质之所以会是频散的,有时是受介质中微观结构的影响,也有时是由于材料的几何尺寸的原因。后者例如,同一种材料做成的棒,当其横向线度远大于声波波长时,声速并不随声频而变化,而当其横向线度接近于声波波长时,则就会产生频散。见“无限大固体中的纵波声速”。

### 非频散(传声)介质

nondispersive (sound bearing) medium

非频散(传声)介质是指声波在其中传播时,它的传播速度不随声频率而变的传声介质。

### 声速度

sound velocity

声波是一种机械扰动在介质中的传播过程,这个扰动随时间的推移而在介质中向前传播,其传播速度称为声速度。

任何一个随时间推移的介质扰动,都可分解为许多个不同频率的简谐波,所以声波总是含有某种频率的特征。在频散介质中,声速与声波的频率有关,这时就声速来说,要区别相速度和群速度。

### 相速度

phase velocity

单频率的声波在介质中传播时,其相位的传播速度称为相速度。

### 群速度

group velocity

介质中任何一个机械扰动,都可以看作是一群单频率波的组合体。如果其频率局限在一个狭窄的范围,它在频散介质中传播时,

其最大能量点的传播速度,称为群速度。

群速度( $c_g$ )和相速度( $c_p$ )的关系是:

$$c_g = \left[ \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\omega}{c_p} \right) \right]^{-1}_{\omega = \omega_0}$$

式中  $\omega$  —— 声波的角频率;

$\omega_0$  —— 波群的“平均”角频率。

在频散介质中, $c_p$ 是角频率 $\omega$ 的函数,所以群速不等于相速,即 $c_g \neq c_p$ 。在非频散介质中, $c_p$ 与 $\omega$ 无关,所以 $c_g = c_p$ ,即为通常的声速。

### 无限大固体中的纵波声速

longitudinal wave velocity in an infinite solid medium

平面纵波在固体介质内传播,当传声介质横截面的线度比声波的波长大很多,而声波在传播中不受介质侧界面影响时,它的传播速度称为无限大固体中的纵波声速。当介质横截面的线度与波长相差不多时,声波的传播就要受到侧界面的影响,其传播速度就会降低,而与声波的频率有关。当介质横截面的线度比波长小得很多时,它的传播速度称为细棒中的纵波声速,它和无限大介质中的声速的差决定于材料的泊桑比和介质的截面形状,这在设计某些超声设备时是需要注意的。

### 细棒中的纵波声速

longitudinal wave velocity in a thin bar

见“无限大固体中的纵波声速”。

### 声吸收

sound absorption

声波在介质内传播过程中,由于介质的粘滞性、热传导性、散射和分子吸收等所导致声能减少的现象称声吸收。

声衰减与声吸收是一个问题的两个方面,对于介质来说是声吸收,对于声波来说是声衰减。

### 声衰减

attenuation of sound

见“声吸收”。

### 辐射声压

sound radiation pressure

辐射声压是在介质中由于较强声波的存在而产生的稳恒超余压强，超余是相对于无声波时的平均稳恒压强而说的。通常的声压，其时间平均值为零，而辐射声压则是时间平均值不为零的超余压强。

### 机电类比

electro-mechanical analogy

根据描述电振荡系统的微分方程和描述力(机械)学振动系统的微分方程在形式上的相似性，常将力学量与相应的电学量作类比，以便借助电路理论来分析力学振动的规律，称之为机电类比。见《电声》章中的“电-力-声类比”。

### 声电类比

electro-acoustical analogy

根据描述电振荡系统的微分方程和描述声振动系统的微分方程在形式上的相似性，常将声学量与相应的电学量作类比，以便借助电路理论来分析声子振动的规律，称之为声电类比。见《电声》章中的“电-力-声类比”。

### 声导纳

acoustic admittance

介质中某一指定面积上的声导纳  $Y_A$ ，是介质通过该面积的体积速度  $U$  与该面积上的声压  $p$  的复数比，即  $Y_A = \frac{U}{p}$ 。其实数部分叫声导(acoustic conductance)，虚数部分叫声纳(acoustic susceptance)。声导纳是声阻抗的倒数。它的单位是声姆欧，即米<sup>5</sup>/牛顿·秒。

见《电声》章中的“声阻抗”。

### 声负载

acoustic load

作用于声源上的声阻抗，就是声源的声

负载。

### 声耦合

acoustic coupling

两物体间具有足够紧密的接触，以致能够进行声能传递，这种情况称为声耦合。

### 临界角

critical angle

当声波到达均匀介质的分界面时，由于两种介质声阻抗率不同，便产生声波的折射和反射。使折射角为 90° 的入射角称为临界角。

#### 第一临界角

first critical angle

当声波从一种介质向固体介质中入射时，声波经过这两种介质的分界面后可出现折射纵波和折射横波。使纵波折射角为 90° 的入射角称为第一临界角；使横波折射角为 90° 的入射角称为第二临界角。这种情况只有在入射波声速小于折射波的声速时才会发生。

#### 第二临界角

second critical angle

见“第一临界角”。

### 指向性

directivity

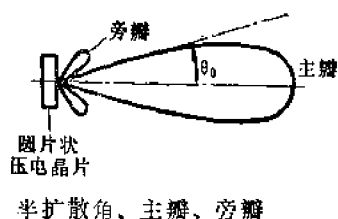
由发射探头发出的超声波，能够集中在一个很窄的空间方向成一束状向被测材料中发送出去，这种性质称为指向性。换能器线度越大，频率越高，则指向性越强。

### 半扩散角

half-angle of spread

表示声束指向性尖锐程度的角度称为扩散角，用第一零辐射角表示。图示是在离声源很远处(远场区域)可观测到的一种指向性图，在声束中心轴上声压最大，往外倾斜时声压逐渐减小，到 0 时声压降为 0，再往外倾斜时，声压又会逐渐增大，并有可能再达到极大值，然后又逐渐降到零，如此等等。

其中  $\theta_0$  为第一零辐射角, 称为半扩散角。绕声束中心轴在半扩散角以内辐射的声束部分称为主瓣, 在主瓣旁侧辐射的声束部分称为旁瓣或副瓣。半扩散角的大小与换能器的直径  $D$  和声波的波长  $\lambda$  有关,  $\frac{\lambda}{D}$  的值越大, 则  $\theta_0$  也越大。



### 主瓣

main lobe

见“半扩散角”。

### 旁瓣

side lobe

见“半扩散角”。

### 多卜勒效应

Doppler effect

当声源和声接收器在连续介质中作相对运动时, 接收器所接收到的声频率会不同于声源所辐射的声频率, 其差别与相对运动的速度有关。这种现象称为多卜勒效应。在医学上利用超声传播中的多卜勒效应, 可探查人体活动器官(如心脏、血管)的活动。在工业上则可利用这一效应制成超声流速计。

### 振动方式

vibration mode

声波来源于物体的振动, 而振动的形式有多种多样。物体振动的这些形式, 叫振动方式或振动模式。例如纵向振动、横向振动、径向振动、厚度振动、切变振动、弯曲振动和扭转振动等等。

关于各种振动模式, 可参见“电子陶瓷与压电、铁电晶体”章。

### 体积胀缩振动

volume dilatational vibration

体积胀缩振动是指在振动激发源的作用

下, 物体的体积发生胀缩变化的振动。例如, 一球体, 当其半径在一平均值  $r_0$  附近作微量的周期性变化时, 球体的体积也跟着发生周期性的胀缩, 即产生了体积胀缩振动。这种振动的球体, 叫脉动球。

### 长度伸缩振动

length extension vibration

长度伸缩振动是指物体在振动激发源的作用下, 引起物体顺长度方向作伸缩的振动。例如, 一根细镍棒绕以线圈, 当线圈中通以交变电流产生交变磁场时, 由于磁致伸缩效应会导致镍棒发生长度的伸长与缩短现象, 即形成长度伸缩振动。

### 扭转振动

torsional vibration

扭转振动是指棒或管在交变性的切变力偶的作用下, 产生扭转形变的振动。扭转振动的特点是棒或管的质点在垂直于棒或管轴线的平面内作绕轴的角振动, 而不改变其到轴线的距离。

### 体波

bulk wave

在固体内部传播的声波叫做体波。这是相对于沿固体表面传播的表面波而言的。一般传声物体的大小总是有限的, 只有当波的频率较高, 它的波长远小于传声物体的线度时, 才能忽略物体界面对它的影响而呈现出体波的特性。所以一般都是在高频超声的范围内才突出使用体波这个名称。体波有纵波和横波, 以及它们相组合的波。

### 表面声波

surface acoustic wave

当声波在介质中传播时, 能量集中在介质自由表面层或两种介质分界面附近的声波称为表面声波。这种波的类型很多, 例如在固体自由表面的瑞利波、声电波, 在两种固体分界面附近的斯通莱波, 以及在液体的自由表面产生的表面波。



**纵波**

longitudinal wave

声波在介质中传播时, 介质质点振动方向与波传播方向相平行的波称为纵波。在纵波通过的区域内, 介质各点发生周期性的稀疏和稠密, 因此, 纵波是胀缩波。

**横波**

transverse wave

声波在介质中传播时, 介质质点振动方向与波的传播方向相垂直的波称为横波。横波只能在具有切变弹性的介质中传播, 因此它仅存在于高粘滞液体和固体中。在横波通过的区域, 介质垂直于传播方向发生剪切形变, 所以横波又称为切变波。由于横波只是使介质发生形变, 而没有体积的变化, 因此横波是畸变波。

**胀缩波**

dilatational wave

有的时候, 研究声波在介质中传播时, 以能否引起介质体积的变化来描述和区分波的类型。当声波传播时, 如果介质中任一小区域的体积发生周期性的膨胀或压缩, 这种波称为胀缩波。纵波具有这种性质, 所以纵波是胀缩波。当声波传播时, 任一小区域的介质只发生形变而不产生体积的变化, 这种波称为畸变波。横波具有这种性质, 所以横波是畸变波。

**畸变波**

distortional wave

见“胀缩波”。

**切变波**

shear wave

见“横波”。

**弯曲波**

flexural wave

弯曲波是一种按弯曲振动的形式向介质中传播的波。它在传播时, 介质中通过传播方向垂直线的平面, 绕着该垂直线作周期性

摆动, 这个摆动着的平面中的质点同时又作振动。弯曲波一般在棒或板中传播。其传播速度与频率有关, 是一种频散波。

**扭转波**

torsional wave

扭转波是在棒状或管状介质中传播的一种波, 这种波使垂直于棒或管轴的平面绕轴作转动振动, 因此介质质点只在垂直于棒或管轴的平面内发生绕轴的角振动, 而不改变到轴心的距离。

**准纵波**

quasi-longitudinal wave

在各向异性固体中, 一般可传播三种波, 除特殊方向外, 这些波的质点振动方向既不与传播方向严格平行也不严格垂直, 而是成一定角度 $\theta$ 。其中比较近似于纵波的一种叫做准纵波, 另外两种比较近似于横波的称为准横波。

**准横波**

quasi-transverse wave

见“准纵波”。

**纯波**

pure wave

在各向异性固体中存在某些特殊方向, 在此方向能传播质点振动方向严格平行或严格垂直于传播方向的波, 这些波分别称为纯纵波或纯横波, 总称为纯波。这些特殊的传播方向称为纯波方向。

**板波**

plate wave

在板状介质中传播的弹性波称为板波。其类型很多, 主要的一种是兰姆波。板波一般为频散波。

**兰姆波**

Lamb wave

兰姆波是在厚度为几个波长的板中传播的一种弹性波。板的两个表面上质点位移与瑞利波的相同, 也是椭圆偏振。它存在着两

种基本波型,即对称型(有时也称为胀缩模)和反对称型(有时也称为弯曲模)。由于板的上下边界的限制,可以存在许多高次模式;当频率较低时,产生的是零次对称和反对称模;当频率增高时就出现高次对称模式。

兰姆波为频散波。

### 瑞利波

Rayleigh wave

瑞利波是在固体的自由表面(指固体的界面以外为真空或空气)传播的声波。可以看做是两个速度相同的非均匀波的迭加;这两个非均匀波中一个是纵波,另一个是质点位移垂直于自由表面的横波。因此瑞利波的质点运动轨迹一般是椭圆。在各向同性材料中,瑞利波有下述一些重要特性:(1)质点位移的振幅随离开表面的深度作指数衰减,大部分能量集中在大约一个波长的深度内;(2)它是非频散波;(3)其速度较体波为慢。在各向异性材料中,上述三个特性基本保持,但定量关系上要复杂得多。瑞利波是目前在微声器件中应用最广泛的一种表面声波,所以有些地方讲的表面声波实际上就是指瑞利波。

### 乐甫波

Love wave

当固体表面有一层不同介质的薄层时,薄层中可以传播一种纯切变弹性波;它的质点振动方向平行于薄层而垂直于传播方向,这种波称为乐甫波。若固体和薄层均为各向同性材料,它们的切变波速度分别为 $V'_s$ 和 $V_s$ :(1)当 $V'_s > V_s$ 时,在频率较低的情况下,这种波在薄层中以接近于 $V'_s$ 的速度传播,同时一部分能量向固体中辐射。当频率增高到一定的值时,波的能量全部限制在层中,而在固体中的振动随深度很快衰减。在频率很高的情况下,则这种波的传播速度趋近于 $V_s$ 。(2)当 $V'_s < V_s$ 时,总存在向固体中辐射的波。由于这种波基本是在薄层中

传播,因此存在各种高次模式,而且波的速度与频率有关,为频散波。

### 声电波(B-G波)

acousto-electrical wave (B-G wave)

声电波是沿某些压电固体自由表面的某些方向传播的一种纯切变表面声波。其质点振动方向平行于表面而垂直于传播方向。它是一种非频散波。据目前理论分析,仅能在压电陶瓷和某些压电单晶的某些切割方向传播。它的振幅随离开表面的深度而衰减,但衰减的速率要比瑞利波慢得多,因此大部分能量集中在较厚的表面层内。但当压电固体自由表面覆盖一层金属膜使表面电场短路时,这种波的振幅随深度的衰减便要比自由表面时快得多,此时它的透入深度比较浅。

### 斯顿莱波

Stoneley wave

斯顿莱波是在两种固体介质的分界面上传播的一种弹性波,但只有这两种介质的声速比和密度比限于某个很小的范围内时才存在,波在分界面两侧的质点位移与透入深度和瑞利波相似。

### 楔波

wedge wave

在楔状介质顶部传播的弯曲波称为楔波,其质点位移主要垂直于传播方向和楔顶的对分平面。位移振幅随离开顶端而减小,其衰减规律类似于瑞利波,并与楔的顶角 $\theta$ 有关; $\theta$ 愈小,衰减愈快,这时波的能量集中在楔的顶部,而楔就形成波导。波导中可以存在各种高次模式的楔波。当频率远离截止频率时,各种模式的楔波速度基本上与频率无关,具有非频散特性。作为一级近似,第 $m$ 次模式的楔波速度正比于 $\sin m\theta$ , $m\theta < 90^\circ$ ,因此改变 $\theta$ 角有可能得到速度很慢的楔波。

### 漏表面波

leaky surface wave

在各向异性晶体的自由表面,在某些切

割和传播方向,常有这样一种表面波,它一方面沿自由表面传播,一方面不断向晶体内部辐射体波。具有这种现象的表面波称为漏表面波。因此它沿表面传播的过程中衰减较快。

### 非线性声效应

nonlinear acoustical effect

非线性声效应是,在高强度的声波情况下,传声介质的非线性弹性所引起的声效应。

声波是弹性波,因此它的特性是受传声介质的弹性性质所制约的。弹性介质中应力与应变的关系实际上是非线性的,但在普通的声强下,只能观察到线性那一部分所制约的声波特性。在高声强的情况下,非线性关系的影响变得明显起来,表现为可观察到的声效应。例如,高强度声波在传播中会不断出现畸变,产生高次谐波。又例如,两束相对传播的不同频率的强声波,在相遇区域内会产生频率为二者频率之和的声波。

### 声子

phonon

声子是描述晶格振动或晶格中声波的粒子。

固体里许许多多的原子,有规律地排列在一定的晶格上,同时它们由于热激发而在平衡位置不停地振动着。这许多原子的振动,或叫晶格振动,具有能量。振动的总能量可以看作是许多“粒子”的能量的总和,这些

粒子便是声子。根据量子论,这些粒子的能量只能取离散的值,或者说是量子化的。声子只能存在于晶格中,它实际上不是真正的粒子,而只是一种“准粒子”。

声波在晶格中传播时,会引起简单方式的晶格振动,因此声子也可以用来描述晶格中的声波。在超声学中,为了分析和利用较高频率超声与某些微观结构的相互作用(这些微观结构例如晶格振动,金属中或半导体中的电子等等),声子概念是非常重要的。

### 超声直接放大

direct amplification of ultrasound

超声直接放大是指超声在其传播过程中,在一定条件下,能够从传声介质中的微观结构吸取能量,不断增加自己的振幅的这样一种效应。这种放大方式,完全不同于下述的“间接”放大方式,即先把超声信号变成电信号,然后用电子学的方法放大电信号,再把放大的电信号转换成比原来超声信号加强了超声信号。超声直接放大的一个例子是:在压电半导体材料中传播的超声,当这个材料中的载流子,受到外加直流电场的驱动,与超声同方向移动,并且移动速度超过超声声速时,超声便能从载流子那里吸取能量,从而得到放大。超声之所以能吸收能量,是由于它在具有压电性材料中传播时,会产生电场,通过这个电场,与载流子起相互作用。

## 二、超 声 处 理

### 超声处理

ultrasonic processing

超声处理是利用超声波所具有的能量使物质的一些物理、化学、生物特性或状态发生改变；或者使这种改变的速度加快的过程。如超声乳化可以使两种互不相“溶”的液体（例如油和水）变成彼此互“溶”的乳浊液；超声清洗能够提高清洗的速度和质量。此外，超声搪锡，超声焊接，超声冶金，超声粉碎，超声雾化，超声凝聚，超声金属成形等，均是超声处理的例子。

### 超声发生器

ultrasonic generator

所谓超声发生器，应该是包括超声频电发生器和换能器在内的一种产生超声的设备。但目前习惯上有时把超声频电发生器就叫做超声发生器。实际上应把超声频电发生器叫做超声电源较恰当。

### 超声电源

ultrasonic-frequency power supply

超声电源是供给电声型换能器的一种交流电能源设备。它能产生所需工作频率的一定大小的电功率。有电子管式、晶体管式、电子管和晶体管混合式等品种，还有高频发电机及采用可控硅元件的。

### 频率跟踪式超声发生器

ultrasonic generator with frequency automatic control

这是指超声电源的工作频率能跟随超声换能器（或振动系统）的共振频率的变化而自动调谐的一类超声发生器。此类发生器实际是一个自激振荡多级发生器，而以振动系统作为其共振回路。当振动系统的频率由于

外界条件（如温度升高）和负载（如经受不同的声负载）改变而变化时，超声电源的频率能相应地改变，使振动系统仍然工作在共振状态。达到频率跟踪的一种办法是在振动系统上联结一个反馈换能器，以拾取振动系统的振动讯号，把它正反馈到超声电源的输入端。当相移和增益调节合适以后，就可使发生器的振荡频率一直保持为振动系统的共振频率。另一种频率跟踪的办法，是利用电桥方法拾取与辐射换能器动生阻抗成比例的讯号，正反馈到超声电源的输入端。因为在换能器共振频率附近，其动生阻抗随频率的变化很灵敏，故同样可以保持超声电源的频率一直跟随着振动系统的共振频率。

### 高频发电机

ultrasonic-frequency rotary generator

这是一种原理上与一般工业发电机相同的发电机，只是由于结构上的特殊设计，使所得出的交流电的频率可达到超声频的范围。由于它结构牢固，工作可靠，恒压输出，故对获得大功率超声波来说，这是一种比较好的交流电能源。

### 超声换能器

ultrasonic transducer

超声换能器是一种将其他形式的能转变为所需频率的超声能或是把超声能转变为同频率的其他形式的能的器件。目前常用的超声换能器有两大类，即电声型与流体动力型。

电声型主要有：

1. 压电换能器；
2. 磁致伸缩换能器；
3. 静电换能器。

流体动力型中包括有气体与液体两种类

型的哨笛。

由于工作频率与应用目的不同, 超声换能器的结构形式是多种多样的, 并且名称也有不同, 例如在超声检测和诊断中习惯上都把超声换能器称作探头, 而工业中采用的流体动力型换能器称为“哨”或“笛”。

### 磁致伸缩换能器

magnetostrictive transducer

磁致伸缩换能器是电声型超声换能器。它是利用磁致伸缩材料在周期性磁场作用下, 产生周期性应变的特性(即磁致伸缩效应)做成的换能器。通常在实用中是采用电磁致伸缩材料做成长矩形、单窗、双窗、多窗型的结构外面绕以线圈而成。当线圈通以交流电时, 在线圈内就产生交变磁场, 由于磁致伸缩效应, 处于该磁场中的磁致伸缩材料就产生交变的应变(当交流电的频率与换能器的固有频率相等时, 换能器振幅最大)。从而在换能器的端面就能辐射声能。

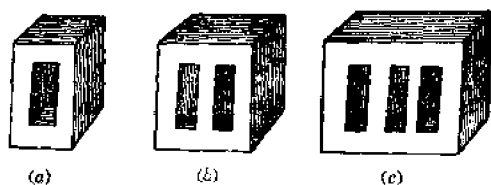
这类换能器在工作时, 需加一个直流偏磁场来调整换能器的工作状态, 实用上较多的是在线圈中通以固定的直流电流以产生一恒定磁场。

磁致伸缩材料有: 镍、铁钴钒合金(铁49%, 钴49%, 钒2%)、铝铁合金(铝13%, 铁87%)以及铁氧体等等。

### 叠片式换能器

laminated transducer

叠片式换能器是用具有磁致伸缩特性的片状材料经成型、氧化、退火等工艺后, 叠合而成的换能器。型式如图所示。图(a)为单窗式换能器, (b)为双窗式换能器, (c)



叠片式换能器

为多窗(三窗以上)式换能器。

这种类型的换能器, 由于采用了多片叠合而片间又是绝缘的, 所以涡流损失小。为了增加辐射面积, 同时减少横向振动和更好地散热, 经常采用双窗甚至多窗的形式。

### 单窗换能器

single-window transducer

见“叠片式换能器”和“蜂窝结构换能器”。

### 多窗换能器

multi-window transducer

见“叠片式换能器”和“蜂窝结构换能器”。

### 蜂窝结构换能器

honey-comb structure transducer

蜂窝结构换能器是由叠片式换能器演变而成的一种的换能器。即叠片的每片或每几片间形成一定的空间间隔, 可以用叠片形成的方法或者片间加衬垫的方法来形成这种空间间隔, 类似于蜂窝状结构。

蜂窝结构换能器的优点是: 改进了换能器的声匹配, 提高了辐射效率, 增大了散热面积。

### 浸没式换能器

immersion transducer

浸没式换能器是为了适应液体中处理要求而设计的一种可以浸没在液体中工作的换能器。其优点是可以在液体中自由移动, 故这种换能器可以用较小换能器处理较大的工件。浸没式换能器通常要求有很好的密封性。

### 压电换能器

piezoelectric transducer

压电换能器属于超声换能器中电声型的一种。它是利用具有压电特性的材料做成的。所谓压电材料就是指这种材料有下列的特性: 把这种材料置于电场之中, 它就产生一定的应变; 相反, 对这种材料施以外力, 则由于产生了应变就会在其内部产生一定方向

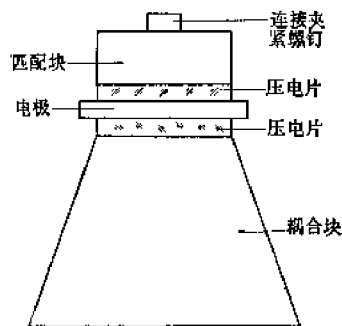
的电场。所以，只要对这种材料加以交变电场，它就会产生交变的应变，从而产生超声振动。因此，用这种材料可以制成超声换能器。

压电材料分为晶体和压电陶瓷两类。属于晶体的如石英、铌酸锂等，属于压电陶瓷的有锆钛酸铅、钛酸钡等。

### 夹心式换能器

sandwich transducer

夹心式换能器是在片状压电晶体或压电陶瓷两面分别夹以相同（或不同）金属块而成的换能器。这种换能器多用于较低超声频率的工作中。如超声清洗机上用的清洗换能器（见图）就是夹心换能器的一种。



夹心式换能器示意图

### 镶嵌式换能器

mosaic transducer

镶嵌式换能器是为了某些特殊要求，由许多小的换能器镶嵌在一起而构成的一种换能器。这种换能器的几何尺寸比较大，结构也比较复杂。

例如，要制作一个直径几十厘米，甚至更大的聚焦换能器，因为制造大直径的压电陶瓷目前工艺上有一定困难，这时采用镶嵌式换能器就比较方便。

### 静电换能器

electrostatic transducer

静电换能器是超声换能器中电声型的一种。它是利用静电电容的变化来达到换能目的。例如静电拾振器等就属于这种换能器。

### 超声换能器材料

material for ultrasonic transducer

指构成电声型超声换能器的具有机电转换效应的材料。这类材料的品种很多，大致可分为压电和磁致伸缩两大类。它们的族系见下表：

超声换能器材料	压电类	压电陶瓷	一元系：钛酸钡，钛酸铅，铌酸钾，偏铌酸铅，等等
			二元系：铅钛酸铅及其系列，铌酸钾钠，偏铌酸铅钨，等等
			三元系：铌钛酸铅-钛酸铅-锆酸铅，铌锆酸铅-钛酸铅-锆酸铅，铌镧酸铅-钛酸铅-锆酸铅，等等
		压电单晶	石英，钛酸钡，酒石酸氢钾，磷酸二氢铵，磷酸二氢钾，硫酸锂，铌酸锂，钽酸锂，锆酸锂，碳酸锂，铌酸钡钠，等等
			压电半导体：氧化锌，硫化镉，硒化镉，等等
	磁致伸缩类		铁磁金属：镍钴，铝铁合金，镍铁合金，铁钴钒合金，镍钴合金，镍铬钴合金，等等
			铁氧体：镍锌，镍铜，镍钴，镍铜钴，镍铜钴，铁氧体，等等

上表所列各种材料，除具有电声特性外，往往还分别兼有铁电、热释电、电光、声光、磁学等其它方面的特性。详见“电子陶瓷”、“压电晶体”和“磁性材料”等有关部分。

### 偏磁电流

magnetizing current

在磁致伸缩换能器工作时，除了要输入交流电以外，还必须在绕组内通入一个直流电流，以使在换能器材料内建立一个恒定的偏磁场，改善工作状态。这个直流电流称为偏磁电流。

### 拾振器

vibration pickup

是机械振动的接收器，它将机械振动转换为电讯号输出。常用的拾振器有压电拾振器（加速度计）、静电拾振器等。在超声工作中，它用来测量换能器、变幅杆的振幅或振幅分布。近年来，也有用激光方法来测这些

量的。

### 反馈换能器

feed-back transducer

它是在频率跟踪式超声发生器中,接在振动系统上的一个附加换能器。其作用是拾取振动系统的机械振动转变成电讯号,以控制超声电源的频率。常用的反馈换能器有:压电换能器、磁致伸缩换能器和静电拾振器等。

### 反馈片

feed-back wafer

这是反馈换能器的一种。由于其外形往往是一个薄片,故叫做反馈片。

### 换能器输入阻抗

transducer input impedance

换能器的输入阻抗是在换能器的输入端所呈现的总电阻抗。它包括箝制阻抗和动生阻抗。换能器输入阻抗随频率而变化,在共振频率附近变化较大。换能器的机械品质因数越大,其输入阻抗变化越尖锐。

### 箝制阻抗

blocked impedance

换能器的箝制阻抗是当换能器被箝制住而不能作振动时,在输入端所呈现的电阻抗。

### 静态阻抗

static impedance

即“箝制阻抗”。

### 动生阻抗

motional impedance

换能器的动生阻抗,是换能器因振动并由于机电转换而在其输入端所呈现的输入阻抗的增加部分,其值等于换能器输入阻抗减去其箝制阻抗的复数之差。

### 阻抗圆

impedance circle

对于磁致伸缩换能器等电感型换能器来说,在其共振频率附近,动生阻抗的值随频率而变化的规律,在阻抗矢量图上常呈现一个圆形,称为阻抗圆。

### 换能器输入导纳

transducer input admittance

换能器的输入导纳是在换能器的输入端所呈现的总电导纳,它包括箝制导纳和动生导纳。换能器输入导纳随频率而变化,在共振频率附近变化较大。换能器的机械品质因数越大,其输入导纳变化越尖锐。

### 箝制导纳

blocked admittance

换能器的箝制导纳是当换能器被箝制住而不能作振动时,在输入端所呈现的电导纳。

### 静态导纳

static admittance

即“箝制导纳”。

### 动生导纳

motional admittance

换能器的动生导纳是换能器因振动并由于机电转换而在其输入端所呈现的输入导纳的增加部分,其值等于换能器输入导纳减去其箝制导纳的复数之差。

### 导纳圆

admittance circle

对于压电换能器等电容型换能器来说,在其共振频率附近,动生导纳的值随频率而变化的规律,在导纳矢量图上常呈现一个圆形,称为导纳圆。

### 机械品质因数

mechanical quality factor

在一个机械振动系统中,贮存在力抗上的能量与一周期内耗散在力阻上能量的比值,称为该系统的机械品质因数。它是衡量一个机械系统振动性能优劣的一个无量纲量。

### 机电效率

electro-mechanical efficiency

对电声型超声换能器来说,输入换能器的交流电功率中,常有一部分变成电磁损耗而损失掉,其余的转换成振动形式的机械功

率, 此机械功率中, 又会有一部分由于换能器中的摩擦、声吸收等原因而损失掉, 最后剩下的部分才作为辐射声功率而输出到介质中去。因此换能器的机械功率和输入换能器的交流电功率的比值称为换能器的机电效率; 换能器的辐射声功率和其机械功率的比值称为它的机声效率; 而换能器的辐射声功率和其输入交流电功率的比值称为它的电声效率。换能器的电声效率等于其机电效率与机声效率的乘积。

### 机声效率

mechano-acoustical efficiency

见“机电效率”。

### 电声效率

electro-acoustical efficiency

见“机电效率”。

### 流体动力型换能器

hydrodynamic transducer

这是一种把流体的动能转换成声能的换能器。其原理是使流体(气体、液体或蒸汽等)从一定的结构中喷出, 激起其它物体或流体本身的共振来产生声或超声。这类换能器的型式很多, 有簧片哨、空腔哨、旋笛、涡旋哨和圆板哨等。它适于某些工业应用, 例如: 乳化, 粉碎粒子, 助燃, 促进化学反应等。

#### 簧片哨

resonant wedge whistle

这是使流体从喷口射出, 激起簧片共振而产生声波的一种流体动力型换能器。

#### 空腔哨

resonant cavity whistle

这是使流体从喷口射出激起某一腔体共振而产生声波的一种流体动力型换能器。

#### 旋笛

siren

这是由一个定子和一个转(动)子组合成的一种流体动力型换能器, 在定子和转子上各相对地开着许多小孔, 当转子转动时, 高

压流体(多为气体)便在定子和转子上的孔相重合时就喷出, 不重合时就被阻挡住, 这样喷出的流体就一疏一密, 形成声波或超声波。

#### 涡旋哨

vortex whistle

这是一种流体动力型换能器, 其主体是一个圆柱形的腔体, 有一个或二个入口, 高压流体沿切向通过入口射入柱腔体, 再由中心出口处喷出, 这样喷出的流体就形成旋转和振动而产生声波或超声波。

#### 圆板哨

resonant plate whistle

这是使流体从一个喷口喷出, 去激发一个圆板共振而产生声波的一种流体动力型换能器。

#### 变幅杆

amplitude transformer; horn; concentrator

变幅杆是一根半波长的变截面杆。它是机械振动振幅的变换器。它的主要作用是把机械振动振幅放大, 即在其共振时在杆的输出端得到比输入端为大的振动位移。或者说把能量集中在较小的面积上, 产生聚能作用。除此以外, 它还可以作为机械阻抗变换器, 使超声能量由换能器更有效地向负载传输。在变幅杆波节面处通常有一圆盘, 通过此圆盘把振动系统固装在超声设备上。

变幅杆的主要参数有: 放大系数, 形状因数, 输入阻抗等。变幅杆的类型按其几何形状的不同有好几种。最常用的变幅杆有: 圆锥形、阶梯形、指数形和悬链线形等, 另外还有“高斯”形、傅里叶形以及各种组合形变幅杆。

变幅杆也叫聚能器。

#### 聚能器

concentrator

即“变幅杆”。



**面积系数**

area factor

变幅杆的面积系数 $N$ ，是指变幅杆输入端面积 $S_1$ 与输出端面积 $S_2$ 之比的平方根，

$$\text{即 } N = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}.$$

**形状因数**

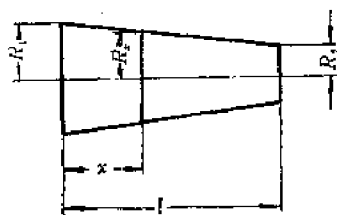
shape factor

变幅杆的形状因数是衡量变幅杆所能达到最大振动速度的指标之一，它与变幅杆的几何形状有关。在变幅杆中，最大振动速度 $v_{\max}$ 和最大应力 $\sigma_{\max}$ 之间的关系是 $v_{\max} = \varphi \frac{\sigma_{\max}}{\rho c}$ ，其中 $\rho c$ 是变幅杆材料的特性阻抗， $\varphi$ 是一个无量纲的量，它仅决定于变幅杆的几何形状，所以称为形状因数。由关系式可见，变幅杆所能达到的最大振动速度，除了受材料的疲劳强度的限制以外，还和所选择的变幅杆类型有关，也就是与变幅杆的形状因数有关。一均匀截面棒的 $\varphi$ 值等于1，对于常用的变幅杆， $\varphi$ 值都小于3，某些特殊形状的变幅杆，如“高斯”型变幅杆， $\varphi$ 值可达到5。

**圆锥形变幅杆**

conical horn

圆锥形变幅杆的半径 $R_x$ 沿轴向按下式变化（见图）：



圆锥形变幅杆

$$R_x = R_1(1 - \alpha x)$$

$$\alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_1 l}$$

式中  $R_1$ ——输入端半径；

$R_2$ ——输出端半径；

$l$ ——半波长变幅杆长度；

$x$ ——轴向距离。

圆锥形变幅杆的放大系数小于面积系数 $N$ 。但形状因数较大。

**指数形变幅杆**

exponential horn

指数形变幅杆的横截面积 $S$ 沿轴向按下式变化（见图）： $S = S_1 e^{-2\beta x}$

$$\beta = -\frac{1}{l} \ln N, \quad N = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}$$

式中

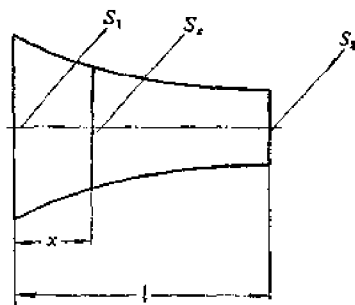
$S_1$ ——输入端面积；

$S_2$ ——输出端面积；

$l$ ——半波长变幅杆长度；

$x$ ——轴向距离。

在共振频率时放大系数等于 $N$ ，即等于输入端与输出端面积比的平方根。纵波在这种杆中传播的速度比在均匀截面的细棒中传播的快，因此半波共振长度比半波长均匀截面棒长，并且对应于一个 $\beta$ 值，有一个截止频率，低于这个频率纵波不能在其中传播。



指数形变幅杆

**阶梯形变幅杆**

stepped horn

阶梯形变幅杆是由两段截面积不同的直杆组成。当两段的长度相等，而且为四分之一波长时，其放大系数最大，等于 $N^2$ 。在相同 $N$ 值下与其他类型的变幅杆相比，它的放大系数最大。但其形状因数小，输入阻抗随频率变化较大。由于它易于机械加工，所以被广泛采用。

### 悬链形变幅杆

catenary horn

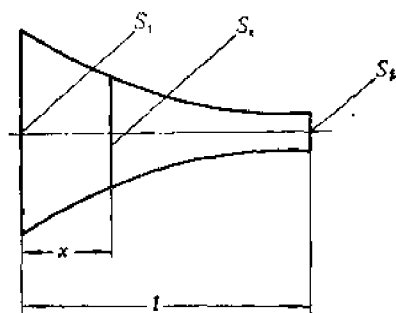
其截面积  $S$  沿轴向按下式变化 (如图):

$$S = S_1 \text{ch}^2 \gamma (l - x)$$

$$\gamma = \frac{1}{l} \text{ch}^{-1} N, \quad N = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}$$

式中  $S_1$  —— 输入端面积;  
 $S_2$  —— 输出端面积;  
 $l$  —— 半波长变幅杆的长度;  
 $x$  —— 轴向距离。

这种变幅杆在共振频率上放大系数大于  $N$ 。同指数形变幅杆一样存在截止频率。



悬链线形变幅杆

### 高斯形变幅杆

Gaussian horn

这种变幅杆的外形如高斯曲线, 其四分之一波长的一段应力沿轴向的分布是均匀的。所以它的形状因数较大, 但放大系数较小。

### 傅里叶形变幅杆

Fourier type horn

这种变幅杆的几何外形是这样决定的。先取一个多阶傅里叶函数代表位移随距离变化的函数, 使按此而产生的振动情况恰能满足预定的边界条件, 然后把此函数代入所导出的波动方程而求得变幅杆应有的截面变化规律。这种变幅杆的一般外形如图所示, 可见其截面仍然是一个逐渐减小的变幅杆。其放大系数、刚性等性能介于指数形和阶梯形变幅杆之间。当有足够高的放大系数时, 其刚



傅里叶形变幅杆

性仍不致过低。四阶傅里叶形比三阶的在性能上要更好, 尤其是放大系数在 100 以上时更为显著。这种变幅杆适用于作高斯形变幅杆的驱动器。

### 复合形变幅杆

complex horn

复合形变幅杆是由几段具有不同截面变化规律的杆组成的变幅杆。例如由一部分是均匀棒和一部分是指数形棒组成, 或者由两部分为不同变化率的指数形棒组成。复合形变幅杆可以满足特殊的性能要求。

### 耦合杆

coupling bar

耦合杆是一种半波长或全波长的均匀截面杆。在超声加工处理设备中, 由于结构设计和超声处理工艺的考虑, 有时要采用它。如超声搪锡设备中, 为了不使搪锡槽的高温影响到换能器的工作, 就需采用耦合杆。

### 超声振动系统

ultrasonic vibration system

在超声加工处理设备中, 把超声频电能转换成超声振动能, 并传送到被处理目标的机构, 叫超声振动系统。它往往包括好几个组成元件, 例如在超声加工机中, 包括有换能器、耦合杆、变幅杆、工具头等。为了改善超声加工机的工作效能, 就需要分析研究整个超声振动系统以及支架结构的综合工作情况。

### 超声功率计

ultrasonic power meter

测量超声功率的仪器叫超声功率计。测量方法有的利用超声波的热效应, 有的利用超声辐射声压。

**声压计**

sound pressure meter

是测超声声压的仪器。测量液体中声压用的超声声压计,是由接收换能器和电讯号放大器两部分组成。

**超声效应**

effect of ultrasound

超声效应系指由于超声在介质内传播而产生的各种效应的总称。

超声效应有机械效应、光效应、电效应、热效应、化学效应、生物效应等。它们在各种不同的超声应用中分别起着不同的作用。

**超声机械效应**

mechanical effect of ultrasound

超声在介质中传播时,引起介质质点的振动,其位移、速度、加速度、声压、声强等力学量所引起的各式各样的效应,称为超声机械效应。如超声粉碎、凝聚等都属于超声机械效应的作用。

**超声光效应**

light effect of ultrasound

超声在介质内传播时,由于空化或其他原因而产生的发光现象的效应叫做超声光效应。

**超声电效应**

electrical effect of ultrasound

超声通过介质时,由于空化产生脉冲高压在空泡表面出现电荷而放电的现象称为超声电效应。

**超声热效应**

thermal effect of ultrasound

超声通过介质时,介质的分界面的摩擦和介质的吸收使超声能转变为热能的现象称为超声热效应。超声热效应的作用如超声医疗方面使生物组织生热等。

**超声化学效应**

chemical effect of ultrasound

超声通过介质时,使介质产生强烈的分

子碰撞或导致分子电离以及其他化学变化的现象叫做超声化学效应。

**超声生物效应**

biological effect of ultrasound

超声对生物有机体起作用的现象称为超声生物效应。植物种子经超声处理后,可加速种子发芽和提高其发芽率与出苗率等就是超声生物效应的作用。声强是影响超声生物效应的一个主要因素,例如,低声强时可能有促进作用,当声强较高时,就可能变为破坏作用。

**声空化**

acoustic cavitation

向液体中辐射声波时,在一定声强下,液体中会产生大量的小气泡,这些小气泡将随声压振动作强烈的生长和更加强烈的闭合运动。最后这种小气泡随之崩溃,这种现象称为声空化现象。这类气泡称为空化气泡。

**空化气泡**

cavitation bubble

见“声空化”。

**空化核**

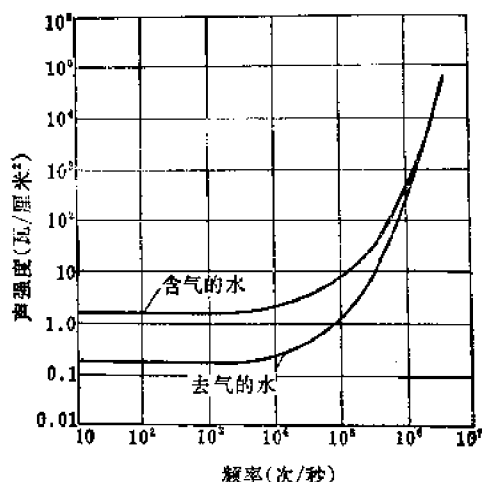
cavitation nuclei

空化气泡是在声作用下,最初由一些微小的气泡逐渐长大而成的。这些微小气泡称之为空化核,通常认为它直径大约在  $10^{-3}$  到  $10^{-6}$  厘米数量级。

**空化阈**

cavitation threshold

液体中产生空化现象所需的最低声强叫做空化阈。它与液体的性质、液体中的含气量、周围大气压以及作用于液体的声频率等因素有关。图示是在室温下水中发生空化时,频率与所需声强之间的关系曲线。从图中可以看出:含气的水比去气的水空化阈值低;频率越高,所需的空化阈值也越高。



空化阈值与频率的关系

## 超声清洗

ultrasonic cleaning

超声清洗是目前工业上应用较广且效果较好的一种清洗方法。

超声清洗时,把被清洗零件浸没在清洗液中,向清洗液中辐射超声。辐射超声的方法有多种,一种是在清洗槽的底或壁上安装单个或多个换能器,也可以采用浸没式换能器,根据情况而定,其目的是使零件需要清洗处都能受到超声的作用。

超声清洗的机理,目前一般认为是由于清洗液在超声作用下产生空化效应的结果。可以归纳为以下几点:1. 空化效应产生的高强度冲击波,直接作用到附着在零件表面上以及零件表面微孔、细缝中的污物,促使它从零件表面上脱离下来;2. 空化作用产生的空化泡渗透到污物与零件表面之间,促使污物脱落;3. 在污物可以被清洗液溶解的情况下,空化效应可加速此溶解过程。

超声清洗的特点是:速度快,清洗质量好,可以清洗复杂零件以及细孔、狭缝中的污物,易于实现清洗过程自动化等。

超声清洗的效果与许多因素有关,主要有:超声频率、声强、清洗液性质及温度、清洗时间以及零件在清洗槽中的放置方式

等。

目前采用的超声清洗可分为两类,一类是所谓低频超声清洗,采用磁致伸缩式或夹心式换能器,频率范围大致是20~60千赫;一类是所谓高频超声清洗,采用压电式换能器,频率范围是几百千赫到一兆赫左右。单从易于产生空化来说,低频较好,但噪声大,令人生厌;频率高时,方向性强,空化强度弱,对于清洗细小零件及细孔、狭缝中的污物较有利。实际应用中要综合考虑来适当选择低频或高频。

超声清洗的适用范围较广,可用于各种工业部门。例如无线电工业中清洗半导体及集成电路零件、电真空器件,机械工业中清洗仪表及机器零件、光学零件;医疗部门中清洗注射针头、医疗器件及放射性染污等等。不仅可以清洗单个零件,也可以清洗整个部件。采取适当措施,还可以进行零部件的局部清洗。对于零件上的氧化膜、毛刺等,选用适当的清洗液进行清洗,可以获得一定的效果,但要求声强较高。

清洗液可根据两方面的因素选取:1. 清洗液易于产生空化;2. 清洗液易溶解污物而对零件无损坏作用。目前常用的清洗液有水、有机溶液、酸和碱溶液等几类。

## 超声加工

ultrasonic machining

超声加工是一种加工硬脆材料(如玻璃、石英、陶瓷、铁氧体、硅、锗、宝石、金刚石等)的方法。它不受材料导电与否的限制,可用于对硬脆材料进行钻孔、套料、切割、研磨等。对于淬火钢和硬质合金等硬而具有一定韧性的材料,也能用超声加工,但加工速度慢些。

超声加工时,在加工区域(工具端面与工件之间)送入磨蚀液,连接在变幅杆输出端的工具以一定的静压力压在工件上,超声换能器产生的超声振动通过变幅杆把振幅加

以放大并传递给工具,工具直接作用于磨料,磨料颗粒就对工件(被加工材料)产生微量击碎和破坏,材料就被逐渐去除。通过磨蚀液的不流动,送入新鲜的磨料,带走已去除的材料碎片,这样就完成了超声加工过程。由于工具振动频率高、振幅小、磨粒细,因而加工精度和加工光洁度均较高,因此,在加工硬脆材料方面获得广泛应用。

超声加工速度、精度和表面光洁度,可以通过适当选择工作频率、工具振幅、磨料种类和粒度等来改变。

### 超声钻孔

ultrasonic drilling

超声加工方法应用于硬脆材料的孔加工(见“超声加工”)叫超声钻孔,它是从机械加工中钻床钻孔的叫法引伸而来。但与普通钻床钻孔时不一样,加工工具可以不作旋转运动,而是作高频小振幅的往复振动,因此,不仅可以加工圆孔,方孔及任何形状的孔,而且通孔或不通孔也能加工。如果采用适当措施保证磨蚀液能输送到加工区域,一般说来加工孔的深度也不太受限制。

在超声加工时,也可采用金刚石粉末压制成的工具,此时工具除了作高频往复振动外,工具与工件还应有相对转动,因而,这时则只限于加工圆孔。

### 超声切割

ultrasonic cutting

超声切割是超声加工的一种方式(见“超声加工”)。加工时工具作成片状,就能对硬脆材料进行切割。

### 超声研磨

ultrasonic grinding

超声加工方法可以用来研磨硬脆材料,称其为超声研磨。超声研磨时,研磨工具和被研磨工件除要按普通研磨方法产生相对移动外,由于研磨工具或者被研磨工件固装在变幅杆上,激励起超声频机械振动(振幅较

一般超声加工硬脆材料的振幅小),致使研磨工具与工件之间产生附加的相对振动,以增加研磨的效果。

### 超声与机械联合加工

ultrasonic-mechanical associated machining

这是在普通的车、铣、刨、磨等加工时,附加一超声振动的加工方式。可以降低切削力,改善加工表面质量。

### 超声与电火花联合加工

ultrasonic electrical spark associated machining

这是在电火花加工过程中,附加超声振动的一种加工方式。即在电火花加工机主轴上装上超声振动系统,为电火花加工的正极,被加工件接为负极,构成超声与电火花联合加工装置。

在电火花加工过程中,由于超声振动,使放电加工区域的液体不断流动,迅速带走电蚀物,并且因超声空化作用,使污物迅速排除出来,这样放电稳定,电蚀量也增大,相应电极损耗降低,效率随着提高。

### 超声与电解联合加工

ultrasonic-electrolytic associated machining

这是在超声加工过程中,加上电解加工来提高超声加工效率的一种方法。在加工硬质合金等导电性硬脆材料时,可以减少工具磨损。

其方法是在超声加工机上,附加一个低电压大电流的直流电源,使超声加工工具头接负极,工件接正极,在磨料液里加有碱液或盐水电解液,混合成悬浮液,并用泵将此悬浮液输送到超声工具头与工件之间,进行加工。因此,除原来超声加工作用外,还有电解加工的作用。

### 磨料

abrasive

磨料是制造砂轮、油石、磨膏的原料。超声加工也要采用它。在超声加工中采用的磨料主要是碳化硅、碳化硼。加工硬度较低的硬脆材料,也可以用氧化铝。加工金刚石时则采用金刚石粉作磨料。加工的表面光洁度和速度与磨料粒度有关。磨料细,加工光洁度高;磨料粗,加工速度快。

### 磨蚀液

abrasive suspension

磨蚀液有时又把它叫做磨料悬浮液,它是磨料与某种液体(例如水)的混合物。超声加工硬脆材料时一定要用磨蚀液。加工过程中,刀具的振动冲击磨料,磨料冲击工件而把工件表面的材料一层层剥离下来,同时依靠磨蚀液的不断流动,把新鲜磨料送入加工区域,并排除磨蚀产物(被磨料粒击碎下来的材料)。磨蚀液同时可以冷却工具和零件以及保证工具、磨料和工件之间的声耦合。

### 超声加工生产率

production rate in ultrasonic machining

超声加工生产率可用两种方法来表示:

1. 工具截面积一定时,用工具每分钟的进给量来表示,单位是毫米/分。有时把它叫做超声加工速度。

2. 用被加工材料每分钟平均切蚀量来表示,单位是毫米<sup>3</sup>/分。

超声加工生产率与加工时工具的振幅、静压力、磨料粒度和物理性质、磨蚀液的循环方式以及被加工材料的性质、加工面积、深度等因素有关。

### 超声加工速度

rate of ultrasonic machining

即“超声加工生产率”。

### 超声加工工具磨损率

rate of tool abrasion in ultrasonic machining

是在超声加工过程中,工具头被磨损的

体积与工件被切削去的体积之比。

### 超声焊接

ultrasonic welding; ultrasonic bonding

当在两搭接焊件上加超声振动同时施加一定恒压力时,会使两焊件搭接界面处焊在一起。超声焊接大体上可分为切向振动和纵向振动两种类型。一般说金属材料用切向振动焊接,而塑料或化学纤维制品用纵向振动焊接。超声金属焊接中不但同类金属而且异类金属之间也可以焊接。超声焊接的特点是不需外加热及焊剂,薄片可焊在厚板上。超声塑料焊接不但塑料薄膜、丝、化学纤维可以焊接,而且不规则形状的硬热塑料也能够焊接。影响焊接质量的主要参数是:静压力,焊接时间和所加的功率。在不同焊接情况下,所需功率可由几瓦到几十千瓦。

### 超声点焊

ultrasonic spot welding

超声点焊是点接触的超声焊。如晶体管引线的超声焊接就是属于超声点焊。

### 超声缝焊

ultrasonic seam welding

超声缝焊是一种连续的超声焊接。这种焊接是通过焊头和反射声极作相对滚动来实现的。薄膜或薄板的连续缝焊属于这一类。

### 超声环焊

ultrasonic ring welding

焊头与焊件的接触面做成环状,焊头在超声振动系统的带动下做扭转振动,以此可实现均匀而气密的环状密封焊接,这种焊接方式称为超声环焊。常用于晶体管管壳封装焊接中。

### 超声多点焊

ultrasonic multi-spot welding

超声多点焊是用超声方法一次完成多点焊接的一种超声焊接方法。集成电路的超声倒装焊就是一个例子。

**超声热压焊**

ultrasonic-thermocompression welding

超声热压焊是热压焊和超声焊同时作用的一种新工艺,多在半导体器件的制造工艺中采用。它可使焊接工作兼获超声焊和热压焊两方面的优点。

**焊头**

bonding tool

超声焊接工作中的工具头叫焊头。例如,在某些超声焊接设备中,联接在变幅杆末端使变幅杆端面输出的纵振动转换成弯曲振动的横杆,有时就叫焊头。

**声头**

acoustic head

在小型超声点焊设备中,把换能器、变幅杆、焊头以及外壳的整个部件称为声头。其实声头也就是超声振动系统,不过习惯上有时叫做声头。

**超声缝纫**

ultrasonic sewing

采用超声焊接原理,可以使某些人造纤维织品实现无线缝纫,叫超声缝纫。例如利用超声缝纫来锁衣服扣眼和缝纫衣服等。除本色衣服缝纫外,现又发展到彩色缝纫:即将热塑性染料涂在聚乙烯薄膜上(叫声箔),夹在纺织物内送入超声缝纫机,加工完毕后,就可产生永久性彩色缝道。近来适用于超声缝纫的材料有:聚脂、尼龙、的确良、某些聚乙烯和含有65%以上合成纤维的棉混纺物等。

**超声搪锡**

ultrasonic soldering

超声搪锡是利用超声在锡液中的空化现象所产生的机械力来除去浸在锡液中的金属表面的氧化物,并在金属表面搪上一层锡的一种工艺方法。因在铝金属表面搪锡用一般方法比较困难,用超声方法就比较容易做到。目前铝线超声搪锡已实际采用,并正在把搪

锡扩展应用到无线电元件及印刷线路板等工艺。

**超声钎焊**

ultrasonic brazing

超声钎焊与普通钎焊的不同点是不需要加任何焊剂,只利用超声能量来清除零件表面的氧化膜,从而就能达到钎焊。这种焊头一般制成烙铁形称之为超声烙铁。

**超声波峰焊**

ultrasonic peak-welding

超声波峰焊是在通常机械波峰焊的基础上加入超声振动而钎焊工件的一种工艺。它适于钎焊印刷电路板等,特点是可以降低对印刷电路板和元件的预先处理要求,消除虚焊、漏焊,并易实行流水生产。

**超声冶金**

ultrasonic metallurgy

超声冶金一般指通过超声在液态金属中的作用,使金属改变某些性质或制造新的合金的一种方法。超声在冶金中的作用有除气、晶粒细化等。

**超声凝聚**

ultrasonic coagulation

由于超声的作用可引起气体和液体中大小不同的小粒子聚成较大的颗粒或集团,这一凝聚现象可用来净化空气,回收物质,消除污染等。这种过程,称为超声凝聚。

**超声萃取**

ultrasonic extraction

系利用超声振动来加速萃取过程和提高萃取质量。超声萃取比机械搅拌萃取可显著提高过程的速度。超声萃取的用途例如从植物中提取化学品等。

**超声粉碎**

ultrasonic dispersion

在超声作用下,使液体中的固体颗粒破碎为更细小的微粒,这种过程叫做超声粉碎。其工业应用,如用超声粉碎法处理颜料,比

一般机械磨碎法所得的颗粒度更细、更一致，由此染出的织品光泽更好而耐久；在胶体感光乳浊液中，用超声粉碎溴化银微粒，可以制得更细微粒的感光胶片等。

### 超声乳化

ultrasonic emulsification

两种互不相溶的液体，能在超声的作用下混合成为乳浊液，这种过程叫做超声乳化。超声乳化与超声强度和频率有关，在某个强度值以下，乳化不会发生，这个强度值叫做阈值。超声乳化在工业上的应用，例如可以用流体动力型换能器来制取某些农药乳剂等。

### 超声金属成形

ultrasonic metal forming

超声金属成形是在金属成形（如拉丝、冷拉管）过程中叠加上一一定强度超声能，使得金属易于成形，提高产品质量的一种新工艺。在金属成形过程中加上超声能量会减少金属件与模具间的表面摩擦力。因而在拉丝、拉管应用中有增加每次面积的减缩率，改善表面光洁度，延长工具寿命，减少拉力等优点。除拉丝、拉管外，还可应用于薄板滚轧，压缩金属粉末以提高密度等。

### 超声雾化

ultrasonic atomization

超声雾化是利用超声能量使液体形成微细的雾滴的过程。雾滴的大小与频率、液体表面张力等有关，频率越高雾滴越小。超声

雾化已成功地用于医疗及制取金属粉末。

### 超声电镀

ultrasonic electroplating

在电镀液中辐射超声，利用超声波可加速金属电镀过程并改善电镀层的质量。这种电镀方法叫做超声电镀。

### 超声浸渍

ultrasonic immersing

超声浸渍是一种新的浸渍技术。它是在普通大气压下浸渍的时候，加入超声从而加速浸渍效率和改善浸渍质量。它与真空浸渍、高压浸渍等方法比较，所需设备较简单，工艺较简便，而且可提高浸渍质量。目前在C型变压器的生产中已实际采用。

### 超声疲劳测试

ultrasonic fatigue testing

超声疲劳测试是使被测材料的试件激起强力超声共振的一种新的疲劳测试方法。其特点是频率高，测试速度比普通的疲劳试验机快几百倍；设备体积小，试件也小，可减少材料消耗。超声疲劳测试因存在高频效应，得出的结果与普通设备测得到的结果不一样，这一现象还在继续研究。

### 超声处理种子

ultrasonic seed irradiation

利用超声辐照种子，称为超声处理种子。超声处理种子可以加速种子发芽和刺激农作物生长并有可能提高农作物产量。



### 三、超声检测与超声医学

#### 超声检测

ultrasonic inspection and measurement

超声波在介质（固体、液体、气体）中传播时，利用不同介质的不同声学特性对超声波传播的影响来探查物体和进行测量的技术称为超声检测。

当超声波以脉冲形式在介质中传播时，利用反射这一性质，在金属、非金属中可用来探测缺陷的位置和性质，从而对钢板、锻件、焊缝、混凝土、人造石墨等进行探伤检验；在水中，根据反射波可以探测潜水艇和鱼群、测量海底深度以及探查海底地层等；在人体中则可以协助临床诊断疾病（如肝脓肿、肿瘤、胆结石等）和探测胎儿等。利用超声连续波的共振性质，可以测量高压容器、锅炉、轮船甲板等的厚度或腐蚀程度，也可制成机械滤波器。利用超声波的衰减特性，可以研究或测量材料的物理性质。当超声波射到运动体时，利用多卜勒效应，可以测量流速流量、探测心脏血管搏动等。若将超声波作为载波传送某些信号，则可制成水中电话、水中遥测仪等，以进行水中通信。利用超声波在固体、液体中传播的速度远小于电磁波这一特性，可制成超声延迟线和存储装置以及进行电视制式的转换。还可利用超声波检漏、测量液位、粘度、硬度和温度等。除此之外，声发射、声成像技术（包括声全息成像技术）的发展更大大丰富了超声检测的内容。

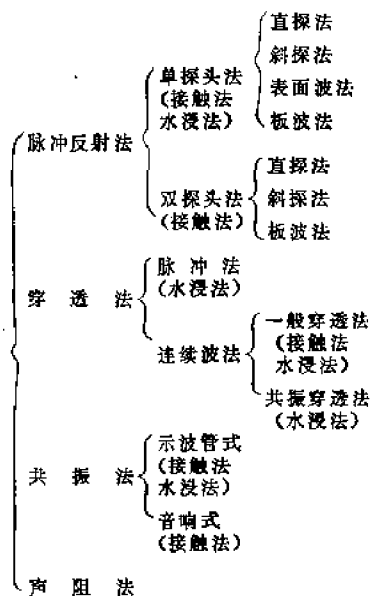
#### 超声探伤

ultrasonic flaw detection

超声波在被检材料（金属、非金属）中传播时，利用材料本身或内部缺陷所示的声学性质对超声波传播的影响来探测材料的组

织和内部缺陷的方法，称为超声探伤。它是一种非破坏性的材料试验方法，即不需破坏被检材料或工件就能探测其内部各种缺陷（如裂纹、气泡、夹杂物等）的大小、形状和分布状况以及测定材料性质。超声探伤具有灵敏度高、快速方便、易实现自动化等优点，因此广泛应用于机器制造、冶金、化工设备、国防建设等部门，已成为保证产品质量、确保安全的一种重要手段。

超声探伤按其方法和目的可分为如下诸种：



#### 脉冲反射法

pulse reflection method

把超声脉冲发射到物体中再接收来自物体中的反射波，这种探伤方法称为脉冲反射法。它是超声探伤中最基本的方法。在脉冲反射法中，根据声束传播情况可分为直探法和斜探法；根据探伤所用波型可分为纵波探伤法、横波探伤法、表面波探伤法和板波探伤法；根据探头个数和作用可分为单探头法

和双探头法, 根据声耦合方式可分为直接接触法和水浸法, 等等。由于这些方法具有各自的特点, 所以广泛用来对金属和非金属材料及其制品进行无损检验。

### 穿透法

#### transmission method

利用穿过被检物体的超声波的穿透率和有无声影进行探伤检验的方法称为穿透法。穿透法有连续波穿透法、脉冲穿透法和共振穿透法等。此方法的优点是适用于薄工件; 由于超声波传播路程仅为反射法的一半, 故适用于检查衰减大的材料; 探伤图形直观, 只要定好检查标准就可进行作业; 易实现自动探伤, 检查速度快。缺点是不能知道缺陷的深度位置; 缺陷探测灵敏度一般比反射法低, 难以检查较小缺陷; 发射探头与接收探头必须对准, 否则接收不到穿透声波。穿透法常用来连续检查板材、棒材和型钢等。

### 共振法

#### resonance method

把频率连续改变的超声波射入被检材料, 根据材料的共振状况测量其厚度或检查有无缺陷等材料性质的方法称为共振法。共振法一般用来测量金属板、管壁、容器壁的厚度或腐蚀程度, 测量声速, 检查板中的分层和进行材质判定。

### 声阻法

#### acoustical impedance method

声阻法是利用被测物件的振动特性, 即被测物对探头所呈现的机械阻抗的变化来进行检测的一种无损检测法。它多用于检测物件表面的成层情况, 例如用来检查基体材料上附粘的膜片是否粘接上等。它的工作频率范围一般都较低(如几千赫)。用这种方法工作时, 把探头和被测件直接接触, 使被测件和探头接合在一起构成一个共振体, 探头一方面是振源, 同时也是检测部件, 当被测件的有效厚度不同时(例如, 若膜片完全

未粘上, 则有效厚度仅为膜片的厚度, 若已完好地粘接上, 则有效厚度包括膜片和基体材料的厚度), 该共振体的频率特性就不同, 从而可根据其频率特性来判定膜片在某个小区域的粘接情况。

### 单探头探伤法

#### single probe testing method

用同一个探头发射并接收超声波的探伤方法称为单探头探伤法。在脉冲反射法中, 这是一种最基本的方法。

### 双探头探伤法

#### double probe testing method

用两个探头, 一个用来发射而另一个用来接收超声波的探伤方法称为双探头探伤法。它比单探头法能检查出更靠近工件表面附近的缺陷, 常用于穿透法探伤和板材、焊缝的探伤。

### 单向探查

#### single direction detection

在超声医学诊断中, 用一个探头发射并接收超声波的方法, 称为单向探查。在原理上它与工业应用中的单探头探伤法完全一样。

### 双向探查

#### double direction detection

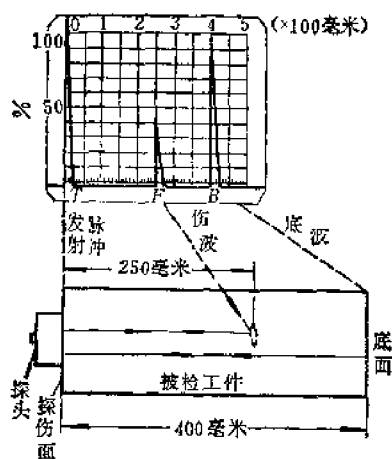
这是在超声诊断工作中利用两个又发又收的单向探头来完成病变定位的探查方法。它是在单向探查的基础上发展起来的。目前多用于颅脑检查, 探查时两个探头同时置于颅脑两侧相对应部位, 以比较颅脑中线波有无移位, 从而判断颅内有无占位性病变。

### 垂直探伤法

#### normal beam testing method

利用垂直于被检工件探伤面传播的超声波进行探伤的方法, 叫做垂直探伤法, 简称直探法。这是一种用得最普遍的方法, 一般使用纵波进行探伤。常用来检查大型锻件、车轴、铸件等的内部缺陷。接触法垂直探伤的探伤图形如图所示。根据伤波(F)和底

波(B)的时间关系可定出缺陷的深度位置,可利用底波高度帮助判伤,也可以利用多次底面反射测量材料的衰减。直探法由于盲区较大,难以探测近表面的缺陷。



直探法的探伤图形

### 直探法

normal beam testing method

即“垂直探伤法”。

### 斜角探伤法

angle beam testing method

利用倾斜入射到被检工件探伤面的超声波进行探伤的方法称为斜角探伤法,简称斜探法。这种方法主要用于焊缝、钢管的探伤。在车轴和钢轨的检查中也是一种不可缺少的方法。它通常使用横波进行探伤。

### 斜探法

angle beam testing method

即“斜角探伤法”。

### 接触法

direct contact method

探头直接与被检工件接触而其间只有一层很薄的耦合剂的探伤法称为接触法。这种方法灵敏度高,但探头易磨损,扫查速度较慢,而且超声波的发射和接收易受被检工件表面光洁度和探头对工件的压力等因素的影响。

### 水浸法

immersion method

即被测工件全部或部分地浸在水(或其他液体)中以水(或其他液体)作为传声介质的探伤方法。水浸法的主要目的是提高扫查速度。常用于自动探伤。用水浸法,探头不易磨损,探伤较稳定,但探伤灵敏度比接触法低。

### 纵波探伤法

longitudinal wave testing method

利用超声纵波进行探伤的方法称为纵波探伤法。这种方法广泛用于直探法中。在斜探法中根据探伤目的有时也采用。

### 横波探伤法

transverse wave testing method

利用超声横波进行探伤的方法称为横波探伤法。这种方法广泛用于斜探法的探伤中。

### 表面波探伤法

surface wave testing method

即利用表面波进行探伤的方法。此方法通常用于表面光滑的机械零件或管状工件内外表面的探伤等。

### 板波探伤法

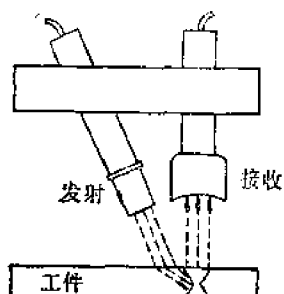
plate wave testing method

即利用板波(兰姆波)进行探伤的方法。此方法常用于薄钢板的连续自动探伤。探伤时常使用轮胎式探头或可变斜角探头,以获得所需的板波波形。

### 三角形探伤法

delta testing method

用两个或两个以上的探头,其中一个垂直于探伤面放置,用来接收超声波,其他探头倾斜放置,用来发射超声波,使发射波倾斜地入射到被检材料中进行探伤,这种方法称为三角形探伤法,又称德尔塔探伤法(如图所示)。发射声波采用横波。发射探头和接收探头的声束中心轴应在同一平面内。三角形探伤法接收到的不仅是反射波,也可能是散射



三角形探伤法

波。它适于检查焊缝的内部缺陷，特别是焊缝内微小的或方向不规则的缺陷。

### 自动探伤

automatic flaw detection

所谓自动探伤就是利用超声探伤时在被检工件或探头移动过程中，当探测到缺陷时即能自动地以某种形式（自动报警、标记、记录等）指示出来。一般地说，自动探伤的探伤精度可能要低于手动探伤，但是可对工件进行比较全面的检查，而且速度快，节省大量的人力和时间。在自动探伤中，必须明确规定合格基准并使之在整个过程中不变动，否则会把很多合格产品误判为不合格，或反之把缺陷漏检了。因此要求自动探伤装置应有很高的稳定性。自动探伤多用于大批量形状比较简单的制品如钢板、管材、型材、带钢等的探伤。探伤方式大部分采用水浸法且以脉冲反射法为多。

### 探头

probe

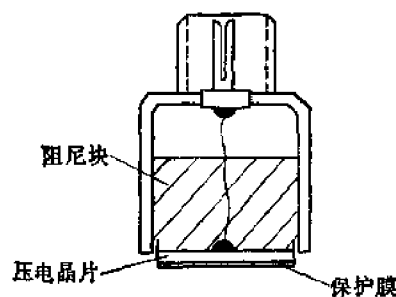
探头是把电讯号转换成超声发射到被检材料中或把从被检材料中接收到的超声转换为电讯号的换能器件。它是超声探伤仪的一个重要组成部分。探头的主要组成部分有：晶片、阻尼块、外壳等；在斜探头中还有斜块（楔）；为了减少晶片的磨损，有的还加有保护膜。晶片起换能作用，系用压电材料制成，常用的有石英、钛酸钡和锆钛酸铅等。阻尼块用衰减大的材料（如环氧树脂加钨粉

并且再加松香、石蜡等添加剂）制成，粘贴在镀好电极的晶片背面用来吸收振动能量，使晶片受发射脉冲电压激励后产生的振动很快地衰减下来，以减少发射脉冲宽度，提高分辨力，并使声波单向辐射，同时用来固定晶片。除了上述压电型探头外，近年来还在研究发展利用电磁型换能作用的探头，适用于检测导电性材料。这类探头按新的结构设计可以工作到很高频率，由于电磁型探头是非接触式的，故还可适于工作在从超低温到很高温度的温度范围。

### 直探头

normal probe

用于垂直探伤的探头称为直探头。直探头通常使用的是纵波，常用来探测材料的横向缺陷。其结构如图所示。

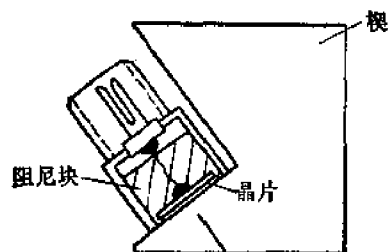


直探头

### 斜探头

angle probe

用于斜角探伤的探头称为斜探头。斜探头主要使用的是横波，常用来探测材料的纵向缺陷。斜探头的基本结构如图所示。加在探头下方的斜块（楔）使声束以一定角度倾



斜探头

斜入射于被检工件。斜块用有机玻璃等制成，其角度通常选择在只使横波折射入工件的范围内。为了减少楔内反射波进入工件，除与工件接触的面之外，往往在声波射到的其它面粘贴吸声材料或加工成凹凸不平的形状，以使声波发生乱反射。

### 水浸探头

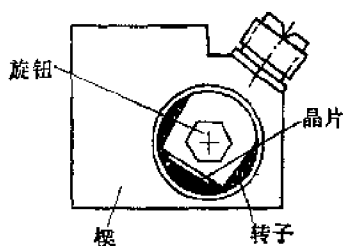
immersion probe

用于水浸法探伤的探头称为水浸探头，通常探头需加密封。

### 可变斜角探头

variable angle probe

使射进被检工件的声束的入射角可以改变的探头称为可变斜角探头。其结构如图所示。当把它的角度调节到各适当的数值时，



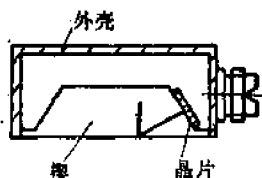
可变斜角探头

就可使它分别产生横波、表面波或板波，因而这种探头就可相应地分别用作横波法、表面波法或板波法探伤，常用于焊缝、板材等的探伤。

### 表面波探头

surface wave probe

表面波探头是斜探头的一种，其结构如图所示。它使表面波沿被检工件表面向某一方向发送出去，同时接收从该方向返回的表面波，常用来检查光滑内外表面的缺陷。例如用于汽轮发电机叶片等的探伤。

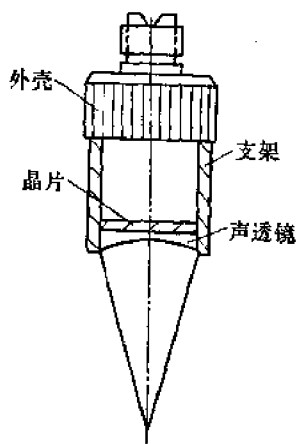


表面波探头

### 聚焦探头

focusing probe

是指能使超声束聚焦的探头。有用晶片直接聚焦和用声透镜聚焦两种，主要用于水浸法探伤。

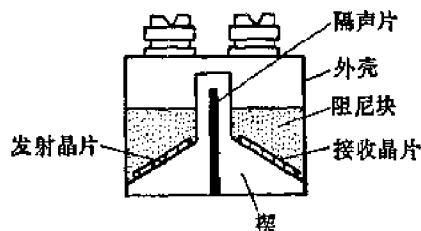


聚焦探头

### 双晶片探头

double crystal probe

在一个探头中具有相互分开的发射晶片和接收晶片的探头称为双晶片探头（俗称联合双探头）。双晶片探头的结构如图所示。



双晶片探头

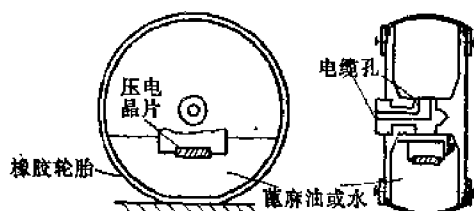
对于薄板和近表面缺陷，用通常的直探头很难进行检查，而用双晶片探头，由于斜块的关系，避免了阻塞现象的影响；又由于晶片倾斜放置，故适于探测薄板和近表面缺陷。这种探头也可用于反射法测厚和钢板的连续自动探伤。

### 轮胎式探头

wheel type probe

在特制的“轮胎”里充以适量的液体，把探头固定在轴上，在被检工件与“轮胎”

之间涂上耦合剂,当“轮胎”转动时晶片与工件的相对位置和方向均保持一定,这种探头称为轮胎式探头(如图所示)。探头的入射角可从 $0^\circ$ (垂直放置)调到所需的某一角度,主要用于板波法自动探伤中。

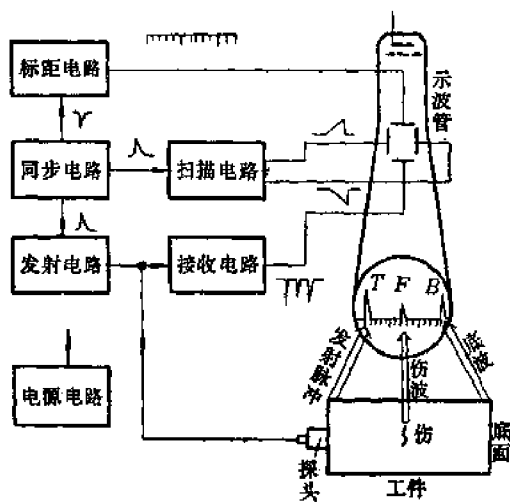


轮胎式探头

### 超声探伤仪

ultrasonic flaw detector

进行超声探伤检验的装置称为超声探伤仪,通常系指脉冲反射式的A型显示超声探伤仪。它能把超声脉冲发射到物体中,同时



超声探伤仪方块图

接收来自物体的反射波而以A型显示的形式把反射波群依次地显示在示波管荧光屏上。超声探伤仪的主要组成部分是:同步电路、发射电路、接收电路、扫描电路、显示电路、电源电路和探头。此外,根据不同用途,还需要采用其它特殊电路,如自动报警电路、自动控制电路、闸门跟踪电路、标距电路等和配置衰减器、记录器等。现在还有利用电

子计算机来进行数据处理的。在自动探伤中,往往采用多通道超声探伤仪。

### 自动报警器

automatic alarm

在超声探伤作业中,发现缺陷时能自动以声音或灯光等形式指示出来的装置称为自动报警器。用此装置,可根据探伤要求选定工件的某一区间范围使落在此范围内的缺陷反射波在超过某一高度(此高度可根据需要预先选定)后自动进行报警,同时输出控制信号使外部控制系统动作。

### 超声多卜勒检测系统

ultrasonic Doppler method testing system

这是应用多卜勒原理来检测物体运动的一类超声设备。仪器发射固定频率的超声波,当反射体与探头之间有相对运动时,反射波的频率就发生变化(即所谓多卜勒频移),频移的程度与相对运动的速度成正比。利用这类设备在工业上可测定管道内液体的流速,在医学上可帮助诊断心脏血管的疾病。近年来由于这项技术的发展,在具体方法上已可分成多种,如连续波式、脉冲波式、相敏式、多通道式以及超声多卜勒显象等。

### 穿透力

penetrating power

第一个底波或第一个穿透波的幅度在探伤仪荧光屏上小到刚刚能显示出来时的被测工件的厚度称为穿透力。穿透力与材料性质、发射强度、频率、探头特性和探伤仪的增益等有关,故在表示穿透力时应具体注明有关条件。

### 探伤灵敏度

flaw detection sensitivity

探伤灵敏度系指在某一具体探伤条件下能探测缺陷大小的能力。因为探伤灵敏度同很多因素(如增益、抑制、探头种类、仪器使用时间等),故实用上通常用标准试块来表示。例如“用2.5兆赫直径20毫米的直

探头，能够发现 CS-1 型标准试块中距直探头表面 200 毫米直径 1 毫米的平底孔”。放大器的增益调得越大，灵敏度也越高；但灵敏度过高时，杂波增多，反而不利判伤，因此必须根据具体情况采用所需的探伤灵敏度。

### 分辨率

resolution

把相距最小的两个相邻缺陷（或病灶）作为两个可区分的反射波显示在超声探伤仪（或超声诊断仪）荧光屏上的能力称为分辨率，通常以这两个相邻缺陷（或病灶）的距离来表示。一般所说的分辨率系指远距离分辨率，而近距离分辨率则指盲区。

### 纵向分辨率

longitudinal resolution

在声束轴线上把相距最小的两个相邻缺陷（或病灶）作为两个可区分的反射波显示在荧光屏上的能力称为纵向分辨率，通常用这两个相邻缺陷（或病灶）之间的距离表示。

### 横向分辨率

transverse resolution

在垂直声束轴线的平面上把相距最小的两个相邻缺陷（或病灶）作为两个可区分的反射波显示在荧光屏上的能力称为横向分辨率，一般用这两个相邻缺陷（或病灶）之间的距离表示。但是，横向分辨率与缺陷（或病灶）到探头的距离有关，所以表示横向分辨率时还必须同时注明此距离。

### 盲区

dead zone

盲区就是超声探伤仪的近距离分辨率，也就是从探伤面到探伤仪能探测出的最近缺陷的距离。盲区不仅与探伤仪本身的性能（如阻塞特性）有关，而且与探头性能有关。

### 抑制

rejection

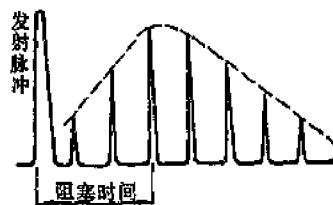
在超声探伤仪中使某一定幅度以下的反

射波或杂波不被显示的方法称为抑制。加抑制时，图形变得较为清楚，便于观测，但是此时放大器的线性变坏，动态范围变窄，对探伤仪的正常工作并不利。当被检材料组织粗糙或降低频率仍出现很多杂波时，在只需探查某种较大缺陷的情况下，适当增加抑制将方便于探伤作业。

### 阻塞

quenching

接收放大器在接收到发射脉冲之后的一瞬间所造成的接收头灵敏度下降或完全失灵的现象称为阻塞。产生阻塞时，会影响近表面缺陷的探测，严重时甚至探测不出来。通常，探伤频率越低，阻塞时间越长。



阻塞特性

### 深度补偿

depth compensation

由于超声在介质中传播时其能量是随着探测深度的增大而逐渐衰减的，因此对于工件中不同深度的同样缺陷，其反射波高度随深度增大而降低。为对同样缺陷进行同样的评价，通常使接收放大器的增益随着超声脉冲射入工件的时间（即射入深度）的增大而提高，以使不同深度的同样缺陷有同样大小的反射波，这叫做深度补偿，亦称距离振幅补偿。

### 距离振幅补偿

distance amplitude compensation (DAC)

见“深度补偿”。

### 耦合剂

couplant

为使探头发射的超声波有效地传入被检

材料而涂敷在探头与探伤面之间以消除其空气间隙的液体或固体称为耦合剂。根据探伤方法、被检材料及探伤面状况的不同可选用各种耦合剂。当表面状态良好时,常用机油或水等;表面状态差时则用甘油、液体石蜡、淀粉糊等。

### 探伤面

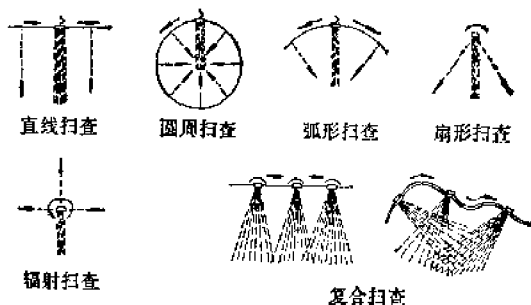
test surface

在接触法探伤中,放置探头进行探伤的工件表面称为探伤面。在水浸法中,探头隔着水正对的工件表面也称探伤面。

### 扫查

scanning

在超声探伤和超声诊断中,为使声束射到预定部位,需要移动或转动探头,这种探头的运动称为扫查。扫查有很多方式,如直线扫查、弧形扫查、圆周扫查、扇形扫查、辐射扫查等,以及由这些方式组合而成的复合扫查,如图所示。



扫查方式

### 探伤图形

pattern

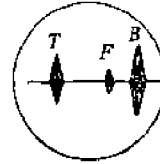
显示在超声探伤仪荧光屏上的波形称为探伤图形,通常指的是A型显示图形。

### 射频显示

radio-frequency presentation (RF presentation)

探头接收到的高频信号经放大后直接显示出来的探伤图形称为射频显示(俗称不检波显示),如图所示。它能真实地反映超声

脉冲在介质中的传播情况,常用来辅助分析探测过程中一些缺陷反射波和杂波的分布情况。

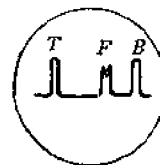


射频显示

### 视频显示

video-frequency presentation (VF presentation)

探头接收到的高频信号经放大并检波后显示出来的探伤图形称为视频显示(俗称检波显示),如图所示。

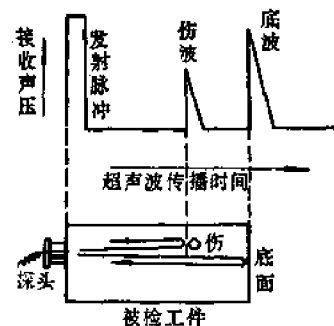


视频显示

### A型显示

A-scope

这是目前脉冲反射式超声探伤仪和诊断仪最基本的一种显示方式,即在示波管荧光屏上以横座标代表超声波的传播时间,纵座标代表反射脉冲的幅度(声压)。对于同一



A型显示原理图



介质，由于传播时间与传播距离成正比，故由反射波所在位置可测读缺陷在工件中的深度或病灶在人体中的深度，据此在某种程度上可推测缺陷（或病灶）的物理性质或大小。A型显示原理如图所示。

#### B型显示

B-scope

将探伤的结果以辉度调制的方式而显示出来的方式称为B型显示。这种显示可得到由探头移动线和声束决定的平面的切面图象，这种图象在超声诊断中称为声象图。

#### P型(PPI型)显示

P-scope (plan position indication)

使发射探头作圆周扫查或扇形扫查，同时使示波管荧光屏上的光点也相应地作辐射扫描，而用辉度调制的方式来显示探测结果的方法，叫P型显示。这种显示方式多用于超声诊断中。

#### BP型显示

BP-scope

B型显示和P型显示的复合显示方式称为BP型显示，也称复合显示。这种方式可使不同界面的反射波重叠在示波屏上，从而减少图象的失真。

#### 复合显示

compound scope

见“BP型显示”。

#### M型显示

M-scope

是一种辉度调制型显示方法，用接收到的回波讯号去调制示波管的亮度。它多用于超声诊断中。在示波管的垂直偏转板上加上快速扫描锯齿波（一般约270微秒左右），以反映被测结构所处的深度位置；在水平偏转板上加上慢扫描锯齿波（约2~8秒，通常为4秒），故当诊断时，探头位置固定不动，从显示图形上不仅可观察反射体的深度位置，还可观察反射体的活动情况，即获得“位置-

时间曲线”（如超声心动图）。

#### 回声图

echogram

在脉冲反射式幅度调制型（A型）诊断仪中，在示波屏上所显示的探测人体组织和器官所得反射波的图形，称为回声图。

#### 声象图

ultrasonogram

在脉冲反射式辉度调制型超声诊断仪中，探测人体组织和器官所得结果，在示波屏上所显示的切面象，称为声象图。

#### 超声心动图

ultrasonic cardiogram

见“超声心动图仪”。

#### 发射脉冲

transmitted pulse

为了进行探伤，用来产生入射于被检材料的超声波的电脉冲称为发射脉冲（俗称始波），常用T表示。通常发射脉冲出现在荧光屏左端。在水浸探伤时，发射脉冲往往不出现在荧光屏上。

#### 伤波

flaw echo

由被检材料内部或表面的缺陷产生的反射波，或由类似缺陷性质的介质声学性质不连续处产生的反射波称为伤波，亦称缺陷反射波，常用F表示。

#### 缺陷反射波

flaw echo

即“伤波”。

#### 底波

bottom echo

来自被检工件底面的反射波称为底波，亦称底面反射波，常用B表示。在接触法垂直探伤中，利用底波可检查探头与被检材料的声接触状况。

#### 底面反射波

bottom echo

即“底波”。

### 干扰反射波

parasitic echo

妨碍探伤的反射波称为干扰反射波。它是假反射波,楔内反射波以及因仪器的噪声、外界干扰等产生的反射波的总称(俗称杂波)。

### 假反射波

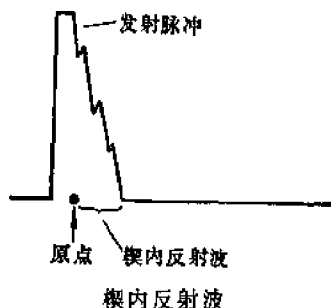
ghost echo

虽不是伤波但看来仿佛伤波的反射波称为假反射波。产生假反射波的原因很多,可能由于不希望有的超声波的反射、干涉、散射以及噪声等造成。它在脉冲重复频率高而衰减较小的材料中更容易出现。

### 楔内反射波

spurious echo

在斜探头中,从晶片发出的声束一部分,在斜块(楔)紧靠探伤面一侧反射后又在楔内杂乱反射而出现在发射脉冲后面的反射波,称为楔内反射波。



### 界面反射波

interface echo; boundary echo

来自声阻抗不同的两种介质的界面的反射波称为界面反射波。例如用水浸法时,来自被检工件表面的反射波也是一种界面反射波。

### 迟到反射波

delayed echo

在物体中所产生的反射波,与直达的相比,因路径不同或途中因波型变换(如纵波变为横波)而延迟到达接收端,这种反射波

称为迟到反射波。用垂直探伤法从端面对圆棒进行探伤时,常出现这种反射波。

### 比较试块

reference block

在实际探伤中,用来调整超声探伤仪(或超声诊断仪)灵敏度等性能的试块称为比较试块(简称试块)。它常用类似被检材料的材质按特定尺寸和形状制成,在超声诊断应用中,则常用有机玻璃制成。根据需要还可把各种类型的人工伤加工在试块上。

### 标准试块

standard test block (STB)

材质、形状、尺寸由主管部门检定的用于评定超声探伤仪性能或选定灵敏度的试块称为标准试块。诸如我国的CS-1型标准试块和国际焊接协会(I.I.W.)规定的IIW型标准试块(俗称荷兰试块)等等。

### 人工伤

artificial defect

在实际探伤中,为了调整探伤仪的灵敏度,用机械加工或电火花加工等方法刻在试块上的伤称为人工伤,或称为人为缺陷。人工伤的种类很多,如平底孔、通孔、纵孔、横孔、V形槽、U形槽、矩形槽和附加的反射体等。

### 人为缺陷

artificial defect

即“人工伤”。

### AVG(DGS)图

AVG(DGS) diagram

这是超声探伤中用来直接评定缺陷大小的一种图表,如图所示。

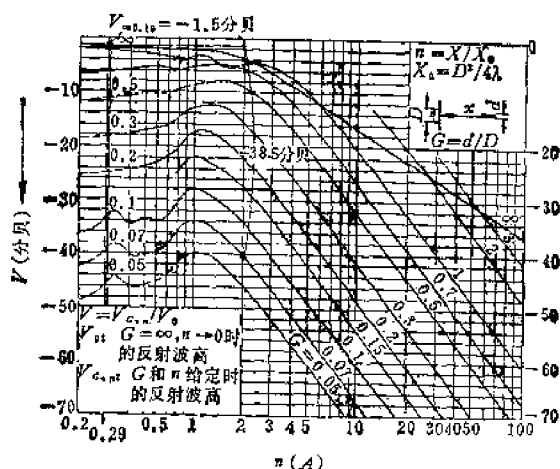
图中A、V、G三个参量分别为德文Abstand(距离)、Verstärkung(增益)、Größe(大小)三个词的第一个字母。其含义是: A表示归一化距离,作横座标,它是探头离缺陷实际距离与所用探头近场长度之比值; V表示归一化增益,作纵座标,它是缺

陷反射声压与探头起始声压之比的对数值,以分贝计,实用上,则以缺陷反射波高与同一探头对置于液体内远外声场中的薄板的反射波高之比来代替声压之比;  $G$  表示归一化缺陷尺寸,它是实际缺陷等效直径与探头晶片直径之比值。

用 AVG 图评定缺陷尺寸比其他方法更有理论根据,并且使用简便。因为引入了归一化参量的概念,使同一张图可用于同一台仪器的不同探头(在直探头时)。

此图大多用于直探头;斜探头探伤也可应用,但需另制一张相应的 AVG 图。

DGS 图即 AVG 图, D、G、S 分别是英文中与德文 A、V、G 同义的三个词的第一个字母。



AVG(DGS)图

## 声发射

acoustic emission

所谓声发射(简称 AE),就是当固体在范性形变(破坏的早期)阶段,因释放能量而产生弹性波发出声音的现象。它是检测缺陷和预报缺陷发展动向的一种新的无损检验技术。也有人称为声放射、应力波发射等。

在生产实践中,声发射现象早已发现。挑着重物的扁担,在破坏之前发出“咔咔”的声音,弯曲锡及焊锡的时候发出的“锡鸣”

以及玻璃破碎时发出的噪声等等,都是日常遇到的声发射现象。

声发射的频谱很宽,从声频一直到超声频。采用不同的方法探测固体材料及构件的声发射规律,可以研究材料的破坏机理,判断材料及构件的抗断裂性能,也可以作为石油化工高压容器、导弹壳体、桥梁、矿井的顶板以及其它处于动态载荷下的大型构件等的很有价值的安全监控工具。它在宇航、原子能、航空等工业中有着广泛的用途。

表征声发射的参量,随着数据处理方式的不同,可以有多种多样。一般采用有:

- 声发射发生率;
- 声发射累积总数;
- 声发射振幅或能量;
- 声发射频谱;

声发射信号由声发射源传播到固定点的时差等等。

## 声发射发生率

acoustic emission rate

单位时间内发出的声发射脉冲数,称为声发射发生率。声发射发生率的值通常是采用加统计权重的方法来记录的,它的大小和加权的办法有重大关系。最常用的加权方法是记每秒超过某预定信号振幅限的脉冲数,这样得到的就是振铃计数发生率。也可以记每秒出现的声发射事件数,这样得到的就是事件发生率。

## 声发射事件

acoustic emission event

声发射事件是材料中以辐射声能形式释放能量的一个快速物理过程。

## 声发射累积总数

acoustic emission comutative counts

在一定的检测时间内,一定频率范围的声发射脉冲的累积次数,称为声发射累积总数。它也是采用加权计数的。

## 声发射振幅

acoustic emission amplitude

它是声发射波的幅度,一般以峰-峰值表示。

## 声发射频谱

acoustic emission spectrum

声发射的频谱范围很宽,由声频到超声频。不同的材料或相同材料在不同的条件下,声发射频谱是相异的,由此也可以评价材料质量情况。

## 声发射源

acoustic emission source

固体中存在缺陷时,在其中造成一种不连续的状态,因而缺陷周围的应变能较高。在外力的作用下,缺陷区所承担的应力高度集中,可以远远大于一般区域,这就进一步使缺陷区的能量集中。当外力增加到某值时,在缺陷区就会发生微观屈服或变形,使应力得到弛豫,一部分多余的能量就以弹性波的形式释放出来,这种缺陷区就是产生声发射的源。如裂纹长大,晶格滑移,孪生和相变等都是声发射源。

## 声发射信号

acoustic emission signal

在固体变形或破坏过程中,其能量通常以声的形式释放出来。就其波形而言(随时间的变化)声发射信号有两种基本类型:连续声发射信号和突发声发射信号。

## 连续发射

continuous emission

这是因固体中的微观形变而产生的一类声发射。这种内部的形变可以说是由于固体中位错移动产生的,它从低载荷时就发生,随着载荷的增加,声发射的振幅,发生率也相应增加,其波形象连续噪声的样子,所以称为连续发射。它具有与白噪声相近的性质,如图所示。



连续声发射波形

## 突发发射

burst emission

这是在固体破坏过程中所产生的一类声发射。它主要是随着微小裂纹的发生和发展而产生的,其发生次数少,而发生的部位也有局限性,所以认为是脉冲状的(声发射的波型在发生点可以认为是非常尖锐的脉冲),所以称之为突发发射。它与连续发射比较,其振幅非常大,不易受环境噪声的影响,如图所示。



突发式信号

突发声发射波形

## 声发射发生率曲线

curve of acoustic emission rate

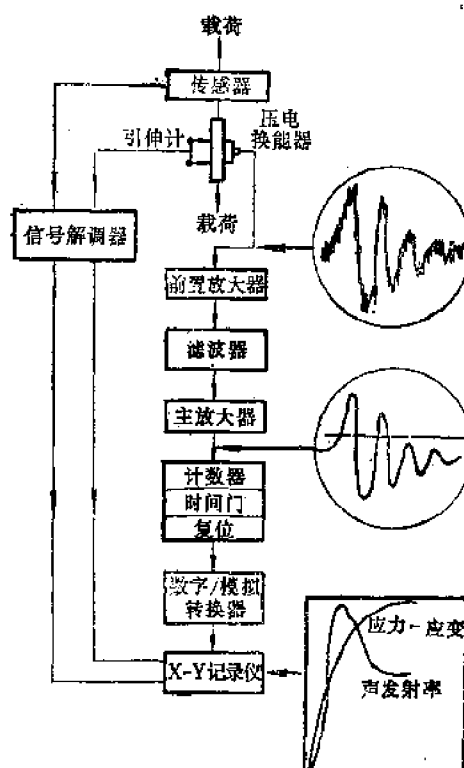


图1 测定声发射率和应力与应变关系曲线的装置方框图

是指固体在变形或破坏过程中, 声发射发生率与应力或应变之间的关系曲线。

图1为测定声发射发生率和应力与应变之间关系的装置方框图。图2为铝拉伸试样在该装置上测出的声发射发生率与应变和应力与应变之间的关系曲线, 其分别由虚线和实线所示, 这条曲线与位错理论计算出来的值是非常一致的。声发射发生率曲线典型地表现了材料变形时, 在弹性区内声发射率是很小的, 进入范性区急剧增加, 达到某一值后, 又急剧下降的规律。又表明材料的声发射机理与位错理论之间有一定关系。

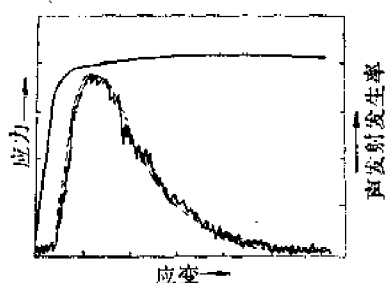


图2 声发射发生率和应力与应变的关系曲线

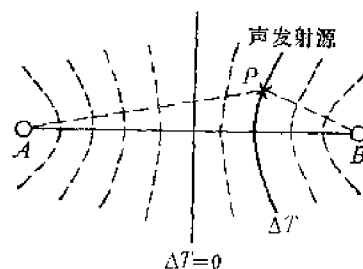
### 声发射源的位置标定

#### emission site location

声发射源位置的标定是借助于检出声发射源发出的声发射信号来确定的。

假如用A、B两点检出, 声发射信号达到的时间差为 $\Delta T_{AB}$ , 那么 $\overline{PA}/V - \overline{PB}/V = \Delta T$ , 即 $\overline{PA} - \overline{PB} = V\Delta T$ , 因探头位置固定, 距离一定, 所以 $V\Delta T$ 一定,  $V$ 为声发射波的传播速度。由此则可以得出以 $\Delta T_{AB}$ 为参量的双曲线族 (即以某点到固定二点间距离差为常量的轨迹)。

满足测定 $\Delta T_{AB}$ 的声发射源, 必然在双曲线族中的某一曲线上。如果再增加检出点C, 那么C与A或B, 也有如同AB之间的关系, 那么满足测定 $\Delta T_{AB}$ 、 $\Delta T_{BC}$ 或 $\Delta T_{AC}$ 的声发射源, 必然为与相应的两条双曲线之交点, 即P点。

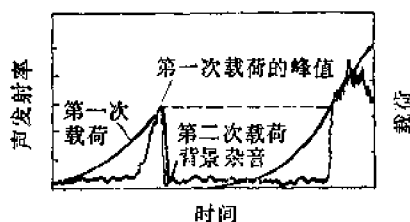


声发射源位置标定原理

### 声发射不可逆效应(凯塞尔效应)

#### Kaiser effect

当固体在应力的作用下产生应变时就会产生声发射, 其声发射发生率随应力增加的变化情况是: 在弹性区域很小, 进入范性区则急剧增加, 至某一点达到最大值, 以后则又逐渐减小。当固体在卸掉载荷之后, 再重新加载时, 只有当载荷接近于以往加载曾达到过的最大值时, 方始出现少量的声发射信号, 直到载荷值超过以往加载达到过的最大值时, 则才有大量的声发射信号发生。这个表征材料受力历史状况的效应称为声发射不可逆效应。图为声发射不可逆效应的一种情况。这种效应也叫凯塞尔效应。



凯塞尔效应示意图

### 凯塞尔效应

#### Kaiser effect

即“声发射不可逆效应”。

### 声发射检测系统

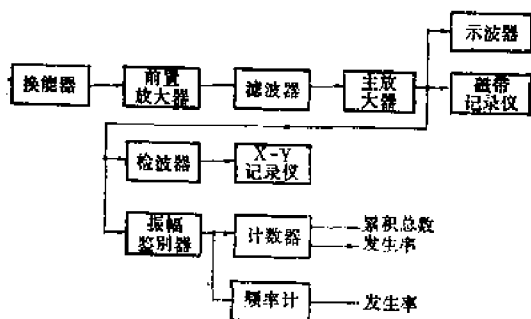
#### acoustic emission detection system

声发射检测系统是指检测声发射的基本设备, 可用于非破坏检验和材料研究。声发射检测一般是把压电换能器直接耦合在待检的试件上。换能器把声发射信号变为电信号输出到高增益低噪声前置放大器和主放大器放

大,在两者间装有滤波器,以便抑制外来的有害杂音,而只选出所需要的声发射信号。

放大器的输出波形可用示波器观察,也可用记录仪记录。如对放大器波形进行包络线检波,用记录仪就可以简单地将声发射的振幅发生状况记录下来。

放大器的输出波形,经振幅鉴别器可求出声发射发生率。当有高于某一电平的信号输入时,就有输出脉冲,然后用计数器记下脉冲数。若一直不将计数器复零,得到的是累积总数;而每隔一定周期将计数器复零,就可以求出发生率。图为比较典型的声发射检测系统方块图。



典型声发射检测系统方块图

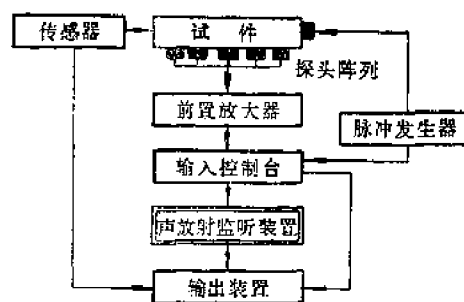
### 声发射监听系统

acoustic emission monitoring system

声发射监听系统是指对处于动态载荷下有缺陷的大型结构部件的监控设备。它能及时的对构件作出破坏性事故的早期预报,是声发射检测系统的一种。它由一些按程式布置的探头阵列、逻辑线路和输出装置组成,用以探测复杂结构里的裂纹在静态和疲劳试验过程的形成和扩展。

图为声发射的一种监听系统方块图。从探头(通频带较宽)来的信号先在试件附近的前置放大器中放大(还起高通滤波器作用),放大后的信号通过同轴电缆传送到输入控制台,然后把信号配送到相应的声发射监听单元里去。声发射监听单元是这个监听系统的核心。每个声发射监听单元接收从一

组探头阵列中的各只探头送来的输入信号,通过一系列逻辑线路对它们进行处理,而以逻辑脉冲作为处理结果送给输出装置。通常用的输出装置是计数器,用它可记下输出脉冲数。其它的输出装置还有:X-Y记录仪,磁带录音机和数字计算机。脉冲发生器是用来试验各个探头的性能以及校验各个声发射监听单元。



声发射监听系统方块图

### 超声测厚

ultrasonic thickness measurement

用超声方法激发容器壁等板状材料作厚度共振,则在测知它的共振频率和材料的声传播速度以后,就可以得出被测件的厚度。这是目前利用超声测厚的一般方法。这种方法,只要接触被测件的一个面就可能测量,故尤其适于测量腐蚀性材料的容器壁或高压锅炉的炉壁厚度等。既可以在工厂正常生产条件下进行测量,也可以连续性的监视测量。

### 超声测硬度

ultrasonic hardness measurement

把一根磁致伸缩杆的一端固定在一个相对大质量的刚体上,另一端镶以金刚石压头。当以恒定的静压力使该压头压入试件表面时,磁致伸缩杆的谐振频率将随压头压入试件的深度而改变,也就是随试件的硬度而改变。将此频率的变化量用仪表指示出来,即可得出试件的硬度值。这就是目前超声测硬度的方法。超声测硬度的优点是迅速,仪器轻巧,可为手提式,可到现场去测量大而不可

易拆卸的零件,测头的压坑浅小,可视为非破坏性的。其缺点是精度不够高,要求被测表面有较高的光洁度。

### 超声测流速

ultrasonic liquid-flow measurement

在管道外面一定距离分别放置超声发射探头和接收探头,使发射出的超声波经过管内流体而达到接收端,则超声波所经历的时间,就要受到管内流体的流速的影响,测出由于这种影响而使传播时间产生变化的值后,就可能推算出管内流体的流速。这是目前超声测流速的一种方法。可以用直接测时间的方法,也可以用循环触发或其他方法来测定时间。此外,还可以利用多卜勒原理测频移的方法,来测定流体的流速。用超声方法测流速,可以不接触被测流体,也不妨害被测物的正常流动。

### 超声测液位

ultrasonic liquid-level measurement

超声脉冲传送到液面时,就要产生反射,因此液面位置的变化,就影响超声脉冲的传播路程,即影响它的传播时间。测出反射脉冲的经历时间,就能够确定出液位的高低,这是超声测液位的一种方法。超声测液位的方法可用来测量密闭容器内的液位高度或其变化,并且还有可能作为一种连续测量或自动控制的手段。

### 超声测粘度

ultrasonic viscosity measurement

把一个特定设计的振动体放进被测液体内,则由于被测液体的粘滞性,将使该振动体的振动受到相应的阻尼,故当测出此振动体作自由振动时的阻尼程度并与在已知粘度的标准试液中的阻尼情况作比较后,就有可能推知被测液的粘度。这是超声测粘度的一种方法。

### 超声测温度

ultrasonic temperature measurement

超声波在物体内的传播速度与温度有关,并且在一定条件下具有线性关系这一特性,可以测量物体的温度。例如,在高温范围内,把超声脉冲传入某耐高温材料的棒,而在棒的另一端面反射,则测出反射脉冲在棒内的经历时间,就可推算出此时的温度。这种超声测高温的方法已可测到1000℃以上的高温。在低温范围内,利用接近液氮状态下氮气中声速与温度的稳定关系,已发展出近液氮时一定范围内的超声温标。

### 超声医学

ultrasonic medicine

超声在基础医学、临床医学、卫生学及其它医学领域中的研究与应用总称为超声医学。由于超声技术的日益发展,其在医学各领域的应用也日趋广泛,目前所涉及的医学内容已非常众多,远超出早先的超声诊断、超声治疗等内容,故可以称之为“超声医学”。超声医学包括:超声在医学中的各种研究与应用,如临床医学中的超声治疗,包括物理治疗中的一般超声疗法,超声透入疗法,超声外科的强声手术,口腔科的洁齿、钻牙等超声处理,吸入疗法中的超声雾化等;临床诊断中的超声回声图诊断,声象图诊断,利用多卜勒效应的血液测定及超声心动图等超声诊断;基础医学中超声在生物学、生理学、生物化学、生物物理学、微生物学的研究,实验生理学、实验外科学及生物制品中的超声技术应用;此外还有超声除尘、超声清洗、超声灭菌、超声乳化及病残人的功能辅助,如超声导盲(超声助视器)等在卫生学或其他范围的医学研究与应用。

### 超声诊断

ultrasonic diagnosis

是利用超声向人体器官发射并接收其回声信号来进行检查的方法。这种方法起源于工业上的超声探伤,是在现代电子学发展的基础上,将雷达技术与声学原理结合起来应

用于临床医学的一种诊断方法。超声诊断所用声强较小,对人体没有损害,操作简便,结果迅速,受检查者无不适感。超声检查目前已广泛应用于颅脑、眼、颈部、乳腺、胃、肝、胆、脾、肾、心脏、血管、腹部及盆腔肿块、胸腹腔积液等疾病的诊断与鉴别诊断以及产科等方面。医学上根据超声回声反射的距离,可探测实质脏器的厚度,肿块距离体表的深度,肿块的大小。通过超声检查还可鉴别肿块的物理性质(囊性、实质性、含气性),检测心血管的功能和其活动规律。随着临床使用经验的积累、仪器的改进,应用范围还在不断扩大。目前使用的超声切面显象、超声心动图、超声多卜勒心血管检测仪,进一步为临床医学提供了诊断依据。

### 超声治疗

ultrasonic therapy

狭义的超声治疗(或称超声疗法)系指一般超声治疗机所应用的治疗范围,使用的超声频率约1兆赫左右。早期用于治疗神经痛、神经炎等病,继而广泛应用于骨、关节、肌肉及其它软组织的创伤、劳损与炎症,呼吸系疾病、消化系疾病,以及疤痕等病理情况,涉及内、外、神经、妇、皮肤、五官等临床各科,近年有试用于治疗眼及脑的疾病。五十年代以来,开始研究应用超声波透入药物的方法,并已用于临床治疗,这一治疗方法也可列入超声治疗范围。

广义超声治疗系指利用超声能的作用进行疾病治疗的任何方法,除上述一般物理治疗学科范围内的超声疗法外,尚包括超声外科,超声喷雾,口腔科的超声处理等。

### 超声外科

ultrasonic surgery

这是利用聚焦超声所获得强大集中能量来破坏机体组织做为外科工具,以代替手术切除的一种外科治疗方法。聚焦超声能够以

毫米计的细小局部产生高达1千瓦/厘米<sup>2</sup>的强大声强,能在体内任一深度在瞬间造成组织破坏。此法具有手术过程中不破坏正常组织、不出血、安全、快速等优点,但因目前尚有一些问题未能解决,故只用于实验外科及动物实验中,临床治疗只少量应用于垂体病、震颤麻痹、某些精神病的破坏性手术等。此外,尚有用超声碎石的方法,也可属于外科范围。

### 超声透入

phonophoresis

利用超声的机械振动作用而不须刺穿皮肤,则可将药物送入人体的方法,称为超声透入。这种方法相似于直流电药物离子透入法,具有局部选择性强、药物集中、局部浓度大、不损伤肌体完整等优点,并且药物不受电作用,不限于必须能电解的药物和水溶性药物,对人体无电解作用等不利影响。目前应用超声透入法的药物有激素类、维生素类、抗菌素类及组织胺、乙酰胆碱、菸酸等多种。

### 脉冲反射式超声诊断仪

pulse reflection type ultrasonic diagnostic equipment

这是利用超声波脉冲反射法制成的一种诊断仪器,仪器的结构类似超声波探伤仪。它是把超声脉冲发射到人体内部,根据来自各种组织、脏器的超声反射信号的形状和分布状况进行诊断的。常用的诊断仪有幅度调制型超声诊断仪和辉度调制型超声诊断仪等。

### 幅度调制型(A型)超声诊断仪

amplitude modulation type ultrasonic diagnostic equipment

这就是A型显示的脉冲反射式超声诊断仪,即用幅度的变化把反射波显示在荧光屏水平轴上,反射波的水平位置对应于声波的传播时间。因为反射波的强弱是用幅度的大小表示的,所以称为幅度调制型。



**超声切面显象仪(辉度调制型)**

ultrasonic tomography equipment

这就是B型、BP型、P型显示的脉冲反射式超声诊断仪。根据不同扫查方法又分B型自动扫查、B型快速自动扫查、旋转式B型快速扫查、多探头扫查显象仪等。

超声切面显象在医学上已广泛应用于肝脏、胆囊、肾、眼、腹部包块等疾病的诊断和产科中。这种方法比A型(幅度调制型)优越之处在于能显示被探查物的形状、大小以及与邻近器官的关系。

**超声多卜勒诊断仪**

ultrasonic Doppler method diagnostic equipment

利用超声多卜勒效应观察心脏、血管的运动,测定血流速度,检测胎儿心脏搏动用的装置称为超声多卜勒诊断仪。这种诊断仪的主要组成部分有:高频振荡器、高频接收器、检波器等,其输出可用耳机、扬声器收听或用记录器记录等。

**超声心动图仪**

ultrasonic cardiogram equipment

这是应用M型显示的超声诊断仪。这类仪器的使用方法是探头固定在某一点,例如对应心脏某部位,由于心脏有节律的收缩和扩张,心脏各层组织和探头间的距离也随之发生节律性改变,在荧光屏上会呈现随心脏搏动而上下摆动的一系列光点,当扫描线沿水平方向从左至右等速移动时,上下摆动的光点便横向展开,即得到心动周期中心脏各层组织结构的活动曲线,这就是超声心动图。

超声心动图法在医学上可用来测量肺动脉、主动脉内径,左、右心房和心室的大小以及室壁厚度,观察二尖瓣活动曲线等。临床

上已用于二尖瓣狭窄、二尖瓣闭锁不全、二尖瓣脱垂、左房肿瘤、心包积液等疾病的诊断。此外也可以检查其他运动脏器如横膈、胎儿的心脏等的情况。

由于超声心动图仪主要用于检查心脏运动,故有时和心电图仪配装在一起,使之同步扫描。也有把心电图仪,心音图仪和它装在一个多射线示波器内,成为一个综合性的检查心血管仪器。

**超声治疗机**

ultrasonic therapy equipment

主要系指物理治疗中的超声治疗设备。它的组成除超声电源部分外,还有一个用压电材料做成的声辐射器供治疗使用。目前常见的或称标准型的超声治疗机频率为800千赫,输出声强约为 $0.2\sim 4$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。此外尚有多种类型,如水冷式、空气冷式,台式、携带式(或手提式),脉冲超声治疗机,连续超声治疗机,以及连续、脉冲超声治疗机等。所用频率有400千赫、500千赫、800千赫、1兆赫、2兆赫、2.5兆赫等多种,有的超声治疗机可产生二、三种或更多种不同的频率,以供几个声头使用。

**医用超声雾化器**

medical ultrasonic atomizer

这是应用超声能量将药液变成微细的雾滴,随着病人的呼吸过程进入呼吸道,作为各种呼吸道疾病(如老年性慢性支气管炎,肺心病等)吸入治疗的一种医疗仪器。此种方法所产生的药物颗粒细小(可达 $2\sim 10$ 微米)、均匀,可深达微小支气管甚至肺泡中,故较一般吸入疗法效果为佳。此外,还可用于同位素雾化吸入检查,作为了解肺部局部通气功能和病变的一项检查方法。

## 四、声成象与声全息

### 声成象

acoustical imaging

声成象就是用声波去照射物体以得到物体的图象的一种成象方法。由于声波能够在许多光学不透明的材料中传播,声成象与一般的光学照相相比,有能够显示物体内部结构的优点,如同X光透视一样。然而,利用超声波去照射物体,比用X光透视,在某些情况下,尚有图象清晰,以及能够显示出人体软组织等优点。所以声成象技术在医学诊断、工业材料非破坏探伤方面,正在得到日益广泛的应用。声成象技术在水声技术中有可能作为水下显示。

在声成象技术中,必须要有一个把不可见的声波象记录下来或转换成可见象的过程,为此所需的方法很多,例如,有利用声的化学效应使照相底片记录声的图象的方法,也有利用声的热效应,用热电偶或热敏电阻探针扫描得到声的图象的方法。因为这两种方法所需要的声强比较大,实际上用得较少。实际应用得比较多的方法主要为下面两类:一类是光学方法,另一类是电子学方法。

光学方法中,有借助于超声波使光衍射的成象方法,还有利用液体表面在声的作用下产生形变,再用光照射而显示出来的成象方法,它们所需要的声强比较小,约 $10^{-4}$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。

电子学方法最灵敏,所需要的声强只要 $10^{-11}$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。这类方法中,有机械扫描法,电子束扫描法(声电管),阵列法等。

早期所采用的声成象技术,都是把由声波照射物体所得的声学图象直接记录和显示

出来,自六十年代中期以来,把全息学原理应用到声成象领域,从而形成了声全息成象这个新的分支。由于声学本身的特点,声全息成象与光学全息照相在原理上和方法上并不完全相同,在应用范围上也将有所不同。声全息成象是正在发展中的一门技术。

### 声全息

acoustical holography

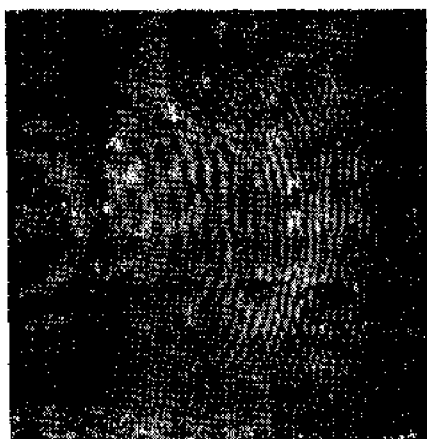
声全息是将全息原理引进声学领域后产生的一种新的声成象技术和信息处理手段。它的特点是通过记录被观察物体声场的全部信息(振幅分布和相位分布)达到成象目的。声全息有可能发展成为人体软组织病变、材料内部缺陷和水中目标图象的新成象方法。

和光全息、微波全息一样,声全息也是利用干涉现象来实现物波全部信息的记录和重建,其过程一般可分为两个阶段:第一步是获得声全息图;第二步由全息图重建物波以获得物体的象。

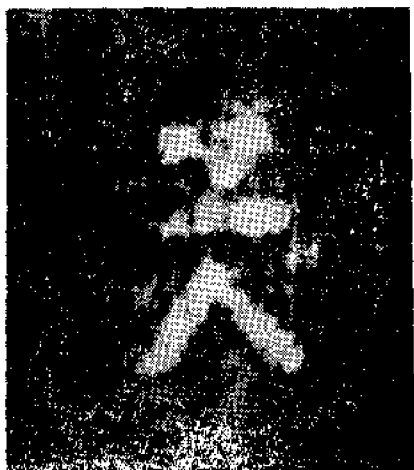
声全息成象的具体方法是多种多样的,按所使用声检测器的不同,大致可分为两大类。一类是采用对声强度敏感的平方检测器。这类检测器有液气界面、液晶等。其中利用液气界面作为声检测器的液面声全息,是比较成熟的方法。另一类是采用对声振幅敏感的线性检测器,例如用压电换能器阵的布阵声全息便是其中之一。线阵机械扫描声全息、电子束扫描声全息、激光束扫描声全息也都属于这一类。采用线性检测器的方法中,参考波可以采用电模拟是它的重要特点。

为了获得物体的可见象,一般用相干光重建。因此,全息图通常记录在照象底片上作为光调制器,并使底片的透光率正比于干

涉图样的强度分布,以供激光重建。有时,在某些特定情况下,声全息也有采用声波重建的。



全息图



重建象



字样

就声全息而言,这个成象过程也可以不分两步而一次完成,即所谓实时重建。例如液面声全息方法中,液面形变本身可以作为一个光调制器,直接进行光重建,而无需先记录好全息图。对于布阵声全息法,也已研制出一种用DKDP电-光晶体作光调制的实时重建实验装置。声全息还可以采用计算机重建,这种方法不用经过记录全息图的过程,也是一种比较快的重建方法。

声全息是六十年代中期出现的新学科,由于它的应用前景,因此引起重视。在方法上和实验技术上均做了大量工作,并取得很大进展。实验也证明了声全息在许多方面有应用的可能性。例如,将液面声全息用于医疗诊断,可以显示出X-光难以分辨的软组织图象,现已能对人体四肢的骨骼、肌肉、血管、乳房中的肿瘤、取出体外的子宫、胆囊、肾脏、死胎等得出较好的图象。这就为显示人体内脏器官、血管、神经的图象,特别是为早期诊断提供了新途径。若用于无损检测,则可能给出金属内部结构及缺陷的图象。

又如,将声全息用于水下显示,已经用布阵声全息进行了基本实验。由于声全息可能在浑浊和有湍流的水中使用,且能对目标成象,因此,在探索潜艇、海底打捞、港口监视以及测绘海底地貌等方面的应用,也是引人注目的方面。

应该指出,由于声波波长较长,存在着分辨率低、目标表面呈镜面反射性质、光重建象畸变以及各种具体应用中的技术问题,使得声全息在应用方面受到一定限制。

作为例子,左图给出1972年在实验水槽中用线阵机械扫描声全息获得的“工人”字样的声全息图、光重建象及字样照片。

### 物波

object wave

在声全息中,物波一般指物体被声源照射后所发出的并到达全息记录平面上的

声波。

### 参考波

reference wave

为了构成全息图,除了物波以外,还需要另外一种与物波相干的波,直接照射到全息记录介质上,这种波叫做参考波。

在声全息中,由于声波(物波)可以用线性检测器转换为电信号加以处理,因此,参考波也可以用电信号的形式来模拟。物波和参考波由同一振荡器发出,以保证它们之间的相干性。

### 声全息图

acoustical hologram

声全息图是声全息中的物波与参考波的干涉图样在介质上的记录。例如全息图的照相底片记录中的每一点的透明度就含有形成全息图的物波在该点上的振幅与相位的信息。

### 振幅全息图

amplitude hologram

如果全息图是由于记录介质的透射率的不同而构成的,则在重建时它是对重建波的振幅起调制作用,这种全息图叫做振幅全息图。例如用照相底片记录的全息图就属于这一种。

### 相位全息图

phase hologram

相位全息图有两种:

1) 如果仅仅记录物波的相位信息而使振幅为常数的全息图叫做相位全息图。

2) 如果全息图是以介质常数或厚度的变化来记录的,则它主要是对重建波的相位起调制作用,这种全息图也叫相位全息图。

为了区别起见,更确切地说,第一种相位全息图应叫做仅有相位信息的全息图。第二种相位全息图应叫做相位调制全息图。

用热塑介质、油膜光阀记录的全息图可作为相位全息图的例子。

### 声全息图的重建

reconstruction of acoustical hologram

用激光照射声全息图,重建原来产生该全息图的物波的波前,由之得出物体的象的过程,叫做声全息图的重建。声全息图重建时至少产生真象及其共轭象。类栅声全息图和栅格声全息图还会产生许多组高阶象。

在液面声全息中,可以用激光照射液面,来得出物体的重建象;对于活动的物体也能得出物体的运动象。这样的重建叫做声全息图的实时重建。布阵声全息和扫描声全息也可以通过实时重建装置进行全息图的实时重建。如把全息图记录在照相底片或其他介质上,再用它进行激光重建,就叫做二步重建。有时在声全息过程中并不把全息图显现出来,直接用全息信息进行重建(如在电子计算机声全息中),这种重建又称之为无全息图重建。

### 共轭象

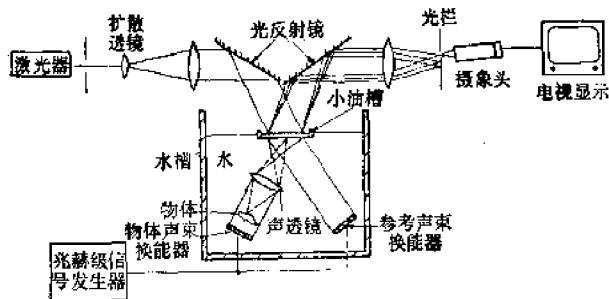
conjugate image

在对全息图进行光学重建时,一般说来,在全息图的两侧,会出现原来物体的两个象:一个是由会聚波形成的实象;另一个是发散波所对应的虚象(亦称真实象)。由于这两个象在数学表示上存在着复数共轭的关系,因此,前者又称为共轭象。

### 液面声全息

liquid surface acoustical holography

液面声全息是利用液面的变形作为形成声全息图的一种方法。工作频率一般为几兆赫,所以有时也叫液面超声全息。液面声全息可以进行实时重建,能得出活动目标的象。在液面声全息方法中,有时把物体的声象,聚焦在液面,从而有可能得出更清晰的重建象。可以采用连续超声波,也可以采用脉冲超声波。当采用脉冲超声波时,可能使成象质量更高。目前采用脉冲超声波的聚焦象方法液面声全息,已曾实验性地试用于医疗诊断和无损检测工作中。



液面声全息示意图

### 布阵声全息

acoustical holography with detector array

布阵声全息是把很多个换能器布成阵列,使它们能一起记录下一帧声全息图。一般在布阵声全息中都采用脉冲态,当目标把声脉冲反射到接收阵面时,才开门接收。接收时间不超过百微秒数量级。每个阵元接收到的声场信号都写入与它对应的存储器中,再顺序地读出,这样便能“冻结”一般动目标的运动。所以,布阵声全息有实际应用前景。

### 机械扫描声全息

acoustical holography by mechanical scanning

机械扫描声全息是指用一个或多个换能器并采用某种机械扫描,以记录一个二维全息图的方法。

机械扫描声全息是一种模拟布阵声全息的方法。布阵声全息虽能观察动目标,但其阵元数目很大,电子线路复杂,所以在实验室中以及在某些实际应用中,都常用机械扫描声全息来模拟。机械扫描声全息虽然只能观察静目标,但阵元数较少是一大优点。

最简单的机械扫描方法是用一个接收换能器作光栅式的机械扫描。它的设备简单,灵活性大,扫描行密度与扫描孔径大小都很容易改变以适应实验的要求。用这种方法,扫

描出一帧全息图需要较长的时间,但是这种方法却为布阵声全息累积了很多有用的数据。近年来,机械扫描声全息有了很大的发展,例如线阵机械扫描、线阵和发射源同时机械扫描等,都因有较快的扫描速度而可能有实际应用的价值。

### 电子束扫描声全息

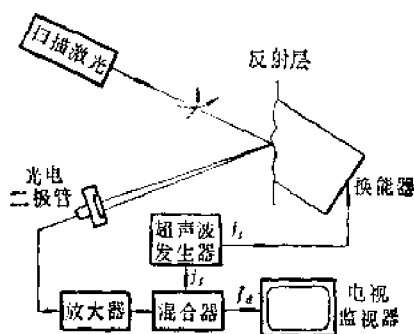
acoustical holography by electron-beam scanning

在声电管中由电子束对压电晶体扫描,把晶体上所记录的声场信号取出,便可以像布阵声全息那样记录一帧声全息图。这种声全息方法比布阵声全息或机械扫描声全息都简单,比液面声全息的灵敏度又高,并且也不受水扰动的影响。这种方法的缺点是声像管的孔径一般都较小,视野角也较小。

### 激光束扫描声全息

acoustical holography by laser scanning

这种声全息方法是把带有物信号的声波投射在一个固体与空气的界面上,它使这个界面产生形变,再用一束激光对界面进行二维扫描。激光束受到界面畸变即声场的调制情况,将在它照射到光电管而从光电管输出信号中反映出来。输出信号与参考信号迭加形成全息图信号。可用示波管显示出全息图。图示是激光束扫描声全息的示意图。



激光束扫描声全息示意图

## 地震全息

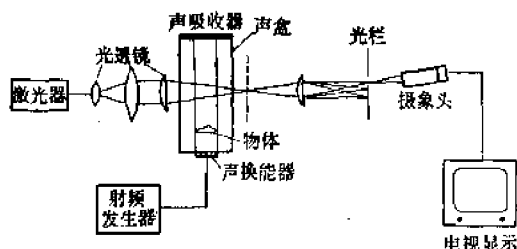
seismic holography

地震全息是一种低频布阵声全息, 由于早期采用爆炸作为声源, 因此而得名。爆炸的频率从次声频到较高声频, 在地震全息中一般采用几十赫到几百赫的频率, 所以布阵的面积很大。用这个方法初步已能得出地层中大规模的不均匀地区(如大空洞等)的像。这个方法仍处在初步试验阶段, 但已有人用它做勘探石油的尝试。

## 布拉格衍射声成像

acoustical imaging by Bragg diffraction

布拉格衍射声成像是一种声光调制成像法。它是利用声场在布拉格条件下对激光进行衍射而使声像显现出来, 因之得名, 原理如图所示。这种方法有可能应用到医疗诊断、无损检测、超声显微镜等方面, 但目前这种技术还处在初步试验阶段。



布拉格衍射成像示意图

## 超声照相机

ultrasonic camera

超声照相机通常指用声透镜或声投影法在面检测器上产生超声象, 并把这个超声象转变成成为可见象的成像装置。多选择兆赫数量级的工作频率。一般用于非破坏性检查与医疗诊断等。随着声全息技术的发展, 声全息成像装置也是一种新型的超声照相机。

## 超声显微镜

ultrasonic microscope

超声显微镜是利用样品声学性能的差别, 用声成像的方法来产生高反差高放大倍数的超声象的装置, 有吸收式超声显微镜、激

光扫描法超声显微镜和布拉格衍射成像法超声显微镜等, 用于显示介质内部的微小结构。因为超声显微镜是利用介质的声学性能而不是光学性能, 所以能用它观察普通光学显微镜和电子显微镜所不能给出的样品内部结构, 例如观察生物系统的内部组织等。

## 声象差

acoustical image aberration

一个理想的声成像装置, 应能把声源(发声的物体或受声照射的物体)的分布结构完全如实地映象出来, 并最后转变成为一个可见象。正如光学成像系统出现各种象差一样, 在声成像装置中, 也由于各种类似的原因会出现声象差。例如球面象差、慧形象差、象散、象场弯曲等。

## 纵向畸变

longitudinal distortion

在光学重建中, 因为形成超声全息图时所使用的超声波束的波长往往比用来重建的可见光波波长两个到三个数量级, 于是重建的光学物体象在纵的方向上也被放大了两个到三个数量级。由于人眼景深的限制, 所感觉到的只是物体的平面象。这种现象称为重建象的纵向畸变。为了得到三维物体象, 正在寻找弥补纵向畸变的重建方法。

## 声电管

acoustical image converter

这是指在屏底装有压电晶体靶的一种特殊电子束管。压电靶用X切压电石英或沿厚度极化的压电陶瓷片做成。压电靶的外面被制成金属电极, 直接与介质接触。入射到靶面上的声波, 产生一幅声压“浮雕”, 在压电靶内面, 相应地产生一幅电荷“浮雕”。它调制由电子束扫描靶面产生的二次发射电子流。这一电子流的输出便是整幅“浮雕”的视频信号。把这一视频信号输入到监视器, 在其屏幕上就会出现可见的图象。如果这个声压“浮雕”是一个物体的声象, 声电管的转

换作用可使我们在监视器屏幕上得到可见的物象。声电管主要用于声成象系统。

**声象转换管**

acoustical image converter

即“声电管”。

**声透镜**

acoustical lens

声透镜是会聚和发散声波的透镜。其作用和外形类似于光学透镜，有双凸形、平凸形、平凹形、双凹形等。透镜材料通常选用与传声介质声阻抗率相近而声速不同、声衰减较小的固体或液体。

**固体声透镜**

solid acoustical lens

用固体材料做成的各种形状的声透镜叫固体声透镜，例如采用有机玻璃材料。

**液体声透镜**

liquid-filled acoustical lens

液体声透镜又称充液透镜，即把液体灌注在由金属箔或非金属材料薄膜做成的透镜

模里。常用的液体如四氯化碳、硅油等。

**声反射器**

sound reflector

使入射声波在其界面上反射而改变传播方向的器件称为声反射器。如平面声反射镜和凸面声反射镜等。

**声聚焦器**

sound focuser

能把声波会聚到一起的器件称为声聚焦器。如各种聚声透镜成凹面声反射器等。

**声孔径**

sound aperture

在声成象装置中，声发射换能器（阵）或接收换能器（阵）的线度，叫做声孔径。

**声栅**

sound grating

一组等宽等间隔的透声狭缝，便是最常见的一种声栅。按其形状有平面声栅和球面声栅之分。可用于声波的频谱分析。

## 五、微波超声

### 微波超声

microwave ultrasound

微波超声一般指频率在 300 兆赫以上的高频超声。“微波超声”的得名,是由于它的频率下限和无线电技术中的微波的频率下限大致相当,也由于在其发展过程中曾大量借用比较标准的微波技术。

近年发展起来的微波超声在科学技术上的应用,特别是与电子技术相结合的应用,使得超声技术,在较传统的超声应用之后,开辟出一个新的领域。微波超声与较传统的超声之间的区分,不仅在于频率上的差异,还在于其应用领域的不同。因此,具有这些较新功能的超声应用,即使频率低至 10~20 兆赫,习惯上也划入微波超声的范畴。

目前,微波超声的主要应用,是在无线电电子学、光电子学等方面。内容就其使用的手段而言,大致可分为以下几类:(1)表面声波技术。由于表面声波波速比电磁波波速小约  $10^6$  倍,在介质表面传播,因而易于接触和处理,又可利用集成电路的平面工艺来制作一般的器件等特点,表面声波技术已用于或试用于雷达、通讯、信息处理、频率分析、计算机等等系统。表面声波技术目前发展较快,应用较广,在微波超声领域中是比较突出的。(2)体声波器件。利用体声波可以制作延迟线、滤波器、谐振器等,已较成功地用于雷达、无线电技术等方面。(3)声光器件。激光和集成光路的发展,促进了声光效应的研究。多种体声波声光调制器已实际应用。近来也开始在研究利用表面声波的声光器件。(4)磁弹波技术。磁弹波有易于电调、适用于较高频率等较独特的作用。

需要提出微波超声在基础研究方面的重要作用。声波愈向高频发展,它与传播介质相互作用的效应便愈多,所渗透的学科领域与应用范围也愈广。当前,微波超声的产生与检测已接近  $10^{12}$  赫,接近固体内热声子的平均频率,这是研究固体物理的一种新方法,它对于原子间的作用力、能量传递等等问题的进一步探讨可能有较大意义。另一方面,在频率为  $10^8$  到  $10^{12}$  赫的横跨 4 个数量级的频率范围内,微波超声在固体及流体中的激发、传播、接收和作用方面,还有不少课题需深入的研究。

### 表面声波技术

surface acoustic wave techniques

表面声波技术是六十年代后期发展起来的声学学与电子学密切结合的新技术。在目前,它主要用于电子学;在雷达、电子对抗、通信、电子计算、信息处理等方面都有用途,有时有比较独特的用途。在其它领域,也逐渐在试用,例如,对集成光学中的光信号进行处理。目前,这些用途有的已实用,例如雷达中的脉冲扩展和压缩,也有不少还处在研究阶段。

从表面声波器件的一般原理,可以了解到表面声波所以能应用到电子学的原因。表面声波在器件中是由电信号产生的,最后又转换成电信号,因此它和电子学发生了联系。在声信号的产生和接收过程中,或者在声信号的传播过程中,都可以对声信号进行信号处理,这样,实际上就对电信号进行了信号处理。

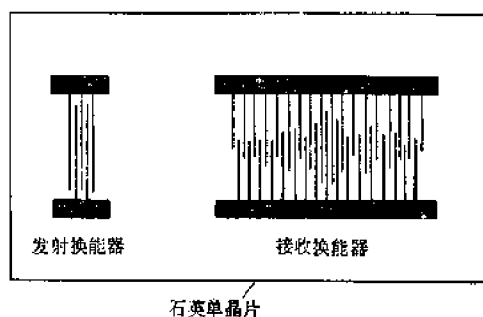
表面声波的传播速度,和体声波一样,比电磁波传播速度小约 10 万倍,表面声波的波



长比同频率的电磁波波长相应地也小约10万倍。因此,和同类的电子学器件比起来,表面声波器件是体积很小的。例如,如果要延迟电信号10微秒,需要电缆几千米,而用表面声波延迟器件,只需几厘米长。

表面声波是在固体表面传播的,所以易于接触,比较容易对它进行声学手段的信号处理。同时,器件可以做成平面型的,可采用半导体集成电路的制造工艺,但在某些方面的要求要高些。表面声波器件可以做到性能稳定可靠,易于成批生产。此外,还在研究把表面声波器件同半导体器件结合起来,把两类器件同时制作在一块硅基片上,发挥各自的特色,并相互配合。

一个比较简单的表面声波器件如图所示,这里表示的是一种表面声波带通滤波器。



一种表面声波带通滤波器示意图

器件主要由一片具有压电性能的材料(例如石英单晶)构成,片厚几毫米,宽1~2厘米,长几厘米。在石英片的一个表面,用光刻工艺刻上两组金属线条,各有正负两个电极。一组金属线条把输入电信号转换为声信号(这组金属线条便构成发射换能器),这个声信号沿着基片表面传播到第二组金属线条,第二组则把声信号转换成新的电信号(这一组金属线条构成接收换能器)。容易看出,两组金属线条有各自的图案;当图案如图中所示那样设计时,输入的电信号,只有在指定频率范围的部分能够通过这个器件。

采用类似的,但有时比较复杂的结构,或

者采用某些较复杂的机理,不仅可以做成简单的延迟线、可变延迟时间的延迟线、多抽头延迟线等,还可以做成多种匹配滤波器,以及做成振荡器、编码器、译码器、卷积器、相关器、计算器、鉴频器、声信号或电信号的放大器等。

由于工艺上的限制,主要是由于金属线条不易刻细和定位不易准确的限制,表面声波器件若采用电子扫描光刻技术,目前可能达到的最高频率只有2千兆赫左右,而采用一般光刻工艺,频率只有几十到几百兆赫。

表面声波技术是比较新的技术,因此理论、实验和工艺都在迅速进展中。当这项技术进一步成熟,并为更多种类专业所了解和掌握时,应用范围有可能进一步地扩大。表面声波器件由于具有上面提到的一些特点,有可能发展到较大规模的批量生产。另一方面,应当把表面声波技术和其他的新技术,特别是电子学中的新技术结合起来。

#### 表面声波换能器

surface acoustic wave transducer

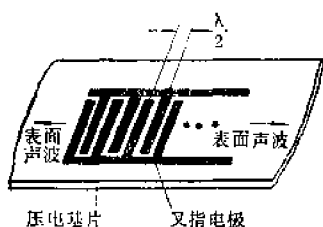
凡是能够产生或接收表面声波的换能器都称为表面声波换能器。一般属电声型,即把电能转换为表面声能,或反过来。目前最常用的表面声波换能器是叉指换能器,还有一些改进型。此外,还在研究只能接收表面声波的MOS管检测器,它的特点是可以做在半导体集成电路所用的硅基片上。

#### 叉指换能器

interdigital transducer

叉指换能器是目前在表面声波器件中最广泛应用的一种表面声波换能器。通常的叉指换能器如图示,是由压电基片上刻上两组金属电极而构成的,两组电极相互交叉,好像两只手的手指交叉放置那样,故得名“叉指”换能器。

叉指换能器的工作原理是,当叉指电极上加上交流电信号时,叉指间产生电场,由



叉指换能器示意图

于逆压电效应,使指间材料发生形变,从而产生表面声波,向换能器的两侧沿相反方向传播出去。相反,由于压电效应,电极能够把传来的表面声波转换成交流电信号。相邻电极间的间距,应为该表面声波的半波长。

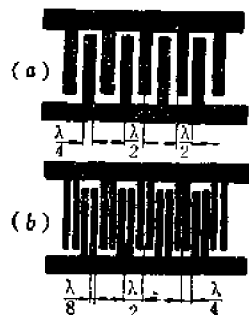
叉指换能器的特点有:1)它为平面结构,利用半导体技术中的光刻工艺,可以在一定程度上方便地制作,又可以和大规模集成电路相掺合;2)通过改变叉指的图案,能够控制换能器的多种性能,如中心频率、相对带宽、脉冲响应和频率响应等;另外,叉指换能器能够实现内加权;3)它的电声转换效率较高。

叉指换能器目前可实现的频率范围约从10~20兆赫到1~2千兆赫。

### 双电极换能器

double electrode transducer

把通常所用叉指换能器(如图(a))中的每条指分成两条指,这样的叉指换能器称为双电极换能器(见图(b))。这种换能器能通过改变反射波的相位来有效地消除叉指对于表面声波的反射,而不影响换能器的基本频



双电极换能器示意图

率,从而避免了这种反射波的干扰。这种结构的缺点是由于指条变细而工艺要求也提高了。

### 双向换能器

bidirectional transducer

在换能器两侧沿两个相反方向同时发射表面声波或可以接受从两侧任一方向传来的表面声波的换能器,称为表面声波双向换能器。通常采用的叉指换能器是双向换能器。在器件中,一般只利用一束表面声波,所以双向换能器发射的声能通常有一半没有用上,这是个缺点。

### 单向换能器

unidirectional transducer

只在一个方向发射(或接收)表面声波的换能器称为单向换能器。单向换能器能够消除双向换能器因向两个方向发射声波而有时浪费一半声能的缺点。

### 宽带换能器

wideband transducer

能够发射和接收较宽的相对频率通带的表面声波的换能器叫做宽带换能器。在表面声波技术中,常用的一种宽带换能器是只有很少几对叉指的叉指换能器,习惯上有时把“宽带换能器”一词当作这种换能器的专称。

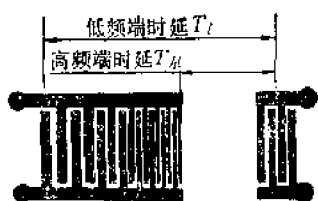
### 频散换能器

dispersive transducer

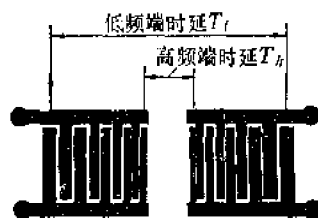
频散换能器是指所发射(或接收)表面声波的频率有一定的范围,而不同频率的表面声波由换能器发射(或被换能器接收)的时间有先后的这样的换能器。

叉指换能器发射(或接收)的表面声波,其频率是由换能器的指宽和指间距决定的。如果逐步改变一个换能器一长排指条的指宽和指间距,使其由宽逐渐变窄(或由窄变宽),则宽的部分激发(或接收)的表面声波频率低,窄的部分激发(或接收)的表面声波频率高,同时由于表面声波在换能器内

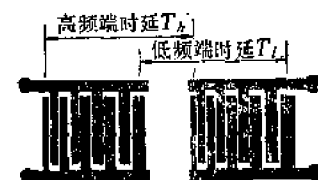
部传播需要时间, 这样的叉指换能器就成为频散换能器。把一个频散换能器和一个由少数几对叉指组成的宽带换能器, 或把两个相同的频散换能器镜像对称地排列, 分别如图 (a)、(b), 可以实现脉冲的展宽或压缩。用两个相同的频散换能器平移排列, 则可以实现宽频带滤波, 如图 (c)。



(a)



(b)



(c)

频散换能器的几种排列方式

### 加权换能器

weighted transducer

对换能器进行“加权”, 就是按一定的函数规律, 对换能器原有的脉冲响应 (换能器外加电脉冲时, 换能器发射表面声波的波形) 或频率响应进行“整形”, 即按一定的函数规律来改变响应的各分量的比重, 使换能器的性能, 从而使器件的性能, 能满足所要求的指标。在表面声波器件中, 对常用的叉指换能器的结构进行一些调整, 例如, 调整叉指

的交叉长度, 使从等长变为按一定规律的不等长, 可以达到某些加权的目的是表面声波器件的优点之一。为了加权而经过适当调整的换能器就是加权换能器。

下面举一个例子来说明“加权”的作用。在一块基片上, 刻上一个等指长的频率线性调制叉指换能器, 并另外刻上一个宽带换能器, 则这块基片可以构成一个脉冲压缩滤波器。经过它压缩的脉冲, 除了主峰以外, 还有许多旁瓣, 而第一个旁瓣比主峰只低 18 分贝左右。这些旁瓣的存在, 特别是高旁瓣的存在, 会淹没收到的弱信号或造成假信号。为了降低旁瓣, 在雷达技术中采用标准的外加电路以实现频率加权的办法。所用加权函数有很多种, 如泰勒加权函数、汉明加权函数等等。在表面声波技术中, 则不用外加电路来加权, 而只要用同样的加权函数对叉指换能器进行加权, 便可以达到同样的目的。具体实现的手段是调整叉指的交叉长度, 使其按指定的加权函数而变化。这种加权法有时叫内加权, 以区别于外加加权电路的外加权。

对叉指换能器实现加权的手段, 除上述改变交叉长度 (幅度加权) 外, 还有调整不同频率的叉指对的数目 (频率加权) 和调整叉指的相对位置 (相位加权) 等。

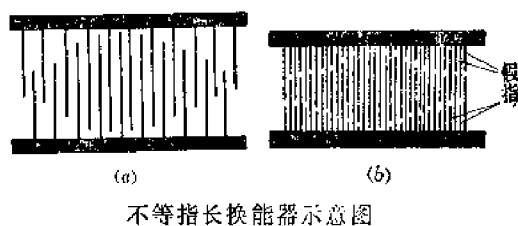
### 不等指长换能器

apodized transducer

在最基本的叉指换能器中, 指长都是相等的, 也就是任一指与相邻指之间的交叉长度是相等的 (决定指间电场分布的是交叉长度)。为了调整叉指换能器的脉冲响应或频率响应, 以满足特殊器件的需要, 可以使叉指换能器中叉指对的交叉长度按一定的函数规律变化, 经过这样加权的叉指换能器叫做不等指长换能器, 如图 (a) 所示。

这样的不等指长换能器有些缺点, 那就是表面声波通过换能器各个部分时, 遇到的

金属区域长度不一致, 这样会使波前发生畸变; 另外, 交叉长度小的指条对所发射的声束的衍射现象较强。这些都会影响换能器的性能。为了部分地解决这个问题, 可以在交叉长度被缩短的地方, 补上一些隔断的、在电学上不起作用的指, 它在声学上能使表面声波通过换能器时, 在各个部分所遇到的金属区域总长度不变。这种指称为假指, 如图(b)所示。



不等指长换能器示意图

### 假指

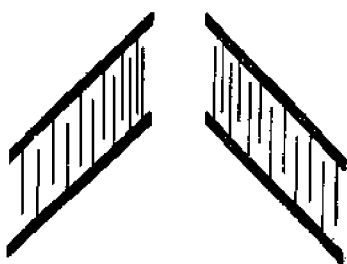
dummy electrode

见“不等指长换能器”。

### 斜形换能器

tilted transducer

把发射和接收表面声波的两个叉指换能器做成倾斜形, 但保持两个换能器中的相应部分在同一水平线上, 这时每个换能器便成为斜形换能器。如图所示。



斜形换能器示意图

这样做时, 表面声波从一个换能器的有关部分传到另一个换能器的相应部分时, 不必象在排在一条线上的两个换能器那样, 要通过许多指条, 从而避免了声波会被许多指条反射等不良影响。

### 表面声波 MOS 检测 (换能) 器

MOS detector of surface acoustic wave

表面声波 MOS(金属-氧化物-半导体的简称)检测(换能)器是利用 MOS 场效应晶体管的压阻效应, 来检测表面声波的换能器。

压阻效应是应力引起电阻率变化的效应。当表面声波通过 MOS 管时, 由于这个效应, 声波的表面应力使流过 MOS 管沟道的表面电流产生调制, 从而声波得到检测。

用 MOS 管的表面声波检测器, 在目前有较大的插入损耗, 这是因为管子的压阻效应不强。但是, 采用 MOS 管, 优点在于可以把表面声波器件和半导体集成电路掺合起来, 并可以使后者扩大前者的功能。例如, 可以用大规模集成电路来控制表面声波多抽头延迟线的 MOS 管抽头的开关, 以形成可控程序的延迟线。为要在硅片上产生表面声波, 需要采用特殊的手段, 例如, 在硅片上相应区域覆盖上压电薄膜, 以便制出叉指型的表面声波发射换能器。

### 等效电路模型

equivalent circuit model

这是把通常用于体声波压电换能器的等效电路, 用作分析表面声波叉指换能器的一种理论分析模型。这个模型是把叉指换能器中的每一个叉指对(包括叉指电极和基片在内)看成一个单元换能器节, 每一节的等效电路和通常体声波换能器的等效电路形式上完全一样, 只是参量不同。整个叉指换能器的等效电路, 就是由这样许多节的等效电路在电学上并联而在声学上串联而合成的等效电路。利用这个等效电路模型可以计算器件的几种性能, 以便对器件进行分析和设计。

等效电路模型中借用的体声波换能器等效电路, 有时用交叉型的, 有时用共线型的, 按照这个差别, 等效电路模型又可细分为交

叉场模型和共线场模型两种。

### 交叉场模型

crossed-field model

在等效电路模型的分析中,把叉指换能器工作时压电基片表面的电场,看成是由垂直于表面和平行于表面的两个分量所组成。在某些情况下,垂直电场的强度比平行电场大得多,因而在分析过程中,可以近似地忽略平行电场而认为所得出的表面声波仅由垂直电场激发产生。这时,电场方向和表面声波的传播方向是相互垂直的,或者说是交叉的,相应地,所类比的体声波换能器也是交叉型的。这样的分析方法叫做交叉场模型。反之,若在另一些情况下,平行电场强度比垂直电场大得多,因而可以忽略垂直电场,认为所得出的表面声波仅由平行电场激发产生,这时,电场方向和表面声波的传播方向是平行的,或者说是共线的,相应地,所类比的体声波换能器也是共线型的。这样的分析方法叫做共线场模型。

### 共线场模型

in-line model

见“交叉场模型”。

### $\delta$ 函数模型

$\delta$ -function model

$\delta$ 函数模型是为分析表面声波叉指换能器的声学 and 电学性能而采取的一种较简单的模型。把电压加于叉指换能器时,在每个指的两个边缘,电场梯度很大,这两处便各自成为独立的 $\delta$ 函数形(接近于直线形)的声源。可以更简单地把每个指看作只是一个(不是两个)这样的声源。于是整个换能器便为一系列这样声源的组合,各个声源的位置与各个指的位置相合,声源振动的相位与指的电压相位相同。这种模型就是 $\delta$ 函数模型。根据这种模型,可以较简单地推算换能器的脉冲响应(即外加一个 $\delta$ 函数电压时,换能器所发射声波的波形)。可以证明,这个波形和

换能器的叉指图案是相似的,因此这种模型有时亦叫做脉冲响应模型。根据这种模型还可以推算换能器的频率响应、电输入阻抗等。

### 脉冲响应模型

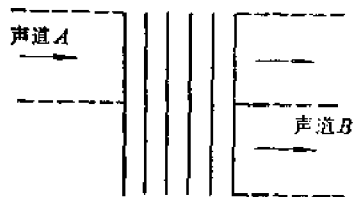
impulse response model

见“ $\delta$ 函数模型”。

### 多条带耦合器

multistrip coupler

多条带耦合器(简称 MSC)是一种表面声波的方向耦合器,它是由沉积在强压电材料(如铌酸锂单晶)基片上的一些平行金属条带构成的。这些条带最简单的形式是一些单纯的直线条,这时耦合器可以把一个声道内传播的表面声波的能量,部分地或全部地通过金属条带耦合到另一个声道,如图所示。图中表面声波沿着声道A入射到金属条带上,金属条带之间产生交变电位差,这些交变电位沿着金属条带传导,也在声道B处出现,声道B上就会产生一个表面声波,它沿着声道B传播。假使金属条带的数目足够多,声道A内的声波会全部转移到声道B。多条带耦合器的金属条带还可采取一些局部弯折的形式,以实现一些其它的功能。



多条带耦合器变换声道示意图

### 反射阵列

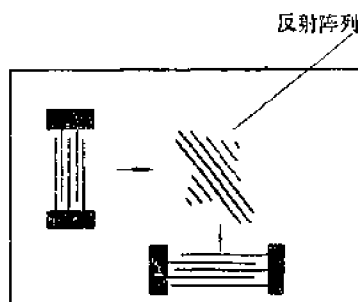
reflective array

在表面声波传播的路途上,在基片的表面刻蚀出一排直线沟槽,或光刻出一排直线金属线条,以有选择地反射表面声波,这些沟槽或金属线条称为反射阵列或反射栅。

表面声波受到反射阵列反射时,其幅度随频率的分布以及其反射的方向等决定于

反射阵列的细致结构(包括沟槽或金属线条的排列方式、沟槽的深度等等)、反射阵列与表面声波原有传播方向的交角等。所以对反射阵列进行适当设计,可用它控制表面声波传播的一些特性。例如,反射阵列可以用来展宽或压缩声脉冲。

图示为一种反射阵列及其反射情况。



反射阵列及其反射

### 表面声波波导

surface acoustic waveguide

表面声波波导是能够引导表面声波较集中地沿着指定的路径而传播的结构。由于结构不同,可分薄膜波导、地形波导等。

### 薄膜波导

thin film waveguide

薄膜波导是在固体表面上,用真空蒸发、溅射或外延生长等技术,镀上一层材料不同

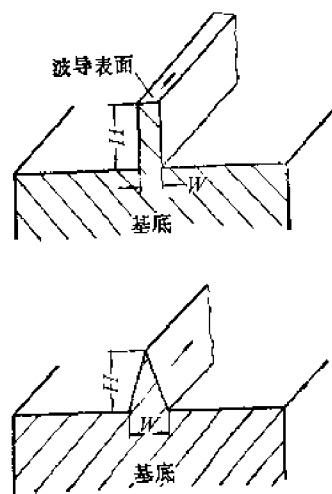
于基片的薄膜,再蚀刻成一定的形状,以引导表面声波沿着它传播。

如果薄膜材料的声速低于基片材料的声速,则蚀刻成凸形,构成“慢”层薄膜波导如图(a);如果薄膜材料的声速高于基片材料的声速,则蚀刻成沟槽,构成“快”层薄膜波导,如图(b)。

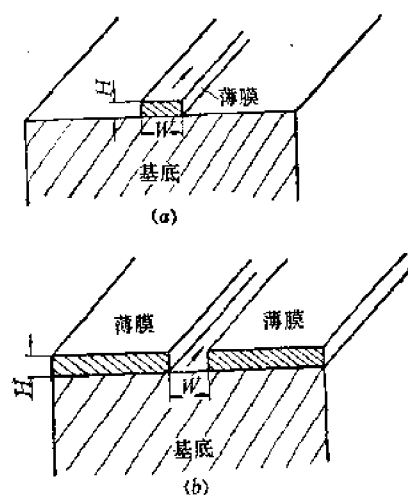
### 地形波导

topographic waveguide

地形波导不同于薄膜波导,它不用第二种材料,而只把基片加工成足够陡峭的局部峰形,这等于改变了基片表面的地势,故称地形波导。图示为地形波导的两个例子。



地形波导



薄膜波导

### 三次行程回波

triple transit echo; triple travel signal

从发射换能器发射的声波到达接收换能器时,有一部分波被接收换能器反射回到发射换能器,这被反射的波又有一部分被发射换能器反射到接收换能器,被接收换能器接收而输出一个电信号。这个信号经过三次跨越,故称三次行程回波。三次行程回波会导致正常的一次行程信号的相位和振幅畸变,所以应当设法抑制。在表面声波技术中,抑制的方法之一是采用双电极换能器来代替普通的叉指换能器。

**次级效应**

second order effect

表面声波器件的实际性能与根据较简单模型求得的理论值不完全一致, 这样器件中会出现一些简单分析所没有考虑到的使器件不能完善地工作的多种效应, 归之为“次级效应”。在具有多叉指的换能器中, 和 $\delta$ 函数模型或一般的等效电路模型相对比, 会出现下列一些主要的次级效应: 表面声波反射、电声信号再生、体声波假信号, 以及声束衍射等。这些效应产生假信号, 使正常的声波畸变, 器件的振幅响应和相位响应不光滑, 器件性能不够理想。但可以用一些方法来避免它们的影响。

**表面声波滤波器**

surface acoustic wave filter

表面声波滤波器是采用表面声波技术来实现电信号滤波的器件。目前比较常用的一种方法是适当设计表面声波器件中发射和接收叉指换能器的结构, 使在电信号和声信号相互转换的过程中, 达到滤波的效果。另外, 也可以在宽带的发射和接收叉指换能器之间刻上一些适当排列的沟槽或金属条(即反射阵列), 使表面声波在传播过程中改变性能, 从而达到所要求的电信号滤波性能。

表面声波滤波器具有性能稳定, 重复性好, 中心频率可以较高(目前一般可由几十兆赫到几百兆赫), 带宽可以较宽等优点, 已逐渐应用于电视、通信和雷达等系统。

表面声波滤波器目前有带通滤波器、带阻滤波器、脉冲压缩滤波器、模拟匹配滤波器等。

**表面声波带通滤波器**

surface acoustic wave band-pass filter

表面声波带通滤波器是利用表面声波技术来实现电信号带通滤波的器件。

比较常用的一种结构, 是在压电基片上制作两个适当图案的叉指换能器, 用以分别

激发和接收表面声波。在激发或接收的过程中, 换能器仅使一个频段的电信号转换为表面声信号, 或仅使一个频段的声信号转换为电信号, 这样就起了带通滤波的作用。当换能器所有叉指的指宽和指间距相同时, 则每个换能器通带的中心频率决定于换能器的指宽和指间距, 带宽则决定于指对的数目, 这两个量是和换能器的基片材料有关的。当换能器各指的指宽、指长和指间距不完全相同时, 随其分布情况而换能器有其特殊的频率特性。若器件是由两个换能器构成的, 则器件的频率响应一般是两个换能器频率响应的乘积。因此可以通过控制各个换能器的指宽、指间距和叉指的交叉长度来实现表面声波带通滤波器所需的通带频率响应。也可以采用其它的结构来实现带通滤波, 例如在两个宽带的叉指换能器之间, 在表面声波通过的路程中, 制作适当的反射阵列以改变表面声波的频率特性, 从而使器件达到所要求的滤波性能。

**表面声波脉冲压缩滤波器**

surface acoustic wave pulse compression filter

利用表面声波技术, 以实现电脉冲信号的展宽或压缩的器件, 叫表面声波脉冲压缩滤波器, 或称表面声波色散延迟线。表面声波脉冲压缩滤波器具有体积小、性能稳定、重复性较好、中心频率可以较高和压缩比可以较大等优点, 在雷达技术中有实际用途。

这类器件的一种结构是利用频散的叉指换能器(频散换能器)。如果逐步改变换能器各叉指的指宽和指间距, 使其逐步由宽变窄(或由窄变宽), 则比较宽的一端对应于低频, 比较窄的一端对应于高频。不同频率的表面声波就会在叉指换能器内的不同位置最有效地被激发或接收。这样的换能器便是频散的。为实现电脉冲讯号的展宽或压缩, 可以用两个相同的频散换能器, 在基片上镜像对称地

放置,如图(a);也可以将其中一个换能器做成频散的,另一个则做成宽带的,如图(b)。这时,由发射换能器指间距小的部分所激发的高频表面声波先到达接收端,而指间距大的部分所激发的低频表面声波后到达接收端,因而各种频率信号的延迟时间就不同。利用这种器件可以实现电脉冲信号的压缩或展宽。为了改善展宽或压缩脉冲的性能,例如为了抑制压缩脉冲的旁瓣,还可以对这样的频散换能器结构实行内加权(见“加权换能器”)。

表面声波脉冲压缩滤波器的另一种方式是利用频散的反射阵列,有时叫做反射阵列脉冲压缩器,如图(c)所示。一个叉指换能器用来发射表面声波,这个波沿着表面上的反

射阵列传播,且被阵列中的斜沟槽所反射。由于反射阵列是频散的,各条沟槽择优地反射相应频率的声波;当相邻沟槽的间隔等于声波的波长时,反射效率最大。于是不同频率的声波从阵列中的不同位置得到反射。被反射的表面声波到达第二个镜像对称阵列时,又被同样地反射到输出换能器。从图可以看出,不同频率的声波,从输入换能器到输出换能器所走过的路程长度不一样,即延迟时间不一样,故器件能完成展宽或压缩脉冲的功能。

用蚀刻沟槽反射阵列来实现脉冲压缩,具有一些优点,主要是它可以消除或减小在大压缩比的叉指结构中导致的几种次级效应。故假信号电平往往比类同的叉指器件低得多。反射阵列脉冲压缩滤波器也可以实行内加权,这可以靠控制沟槽的深度来实现。

#### 反射阵列脉冲压缩器

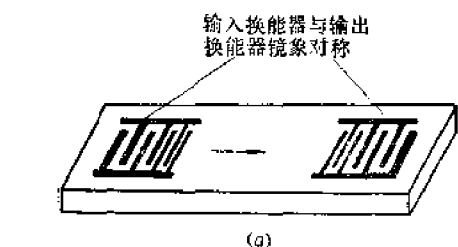
reflective-array compressor

见“脉冲压缩滤波器”。

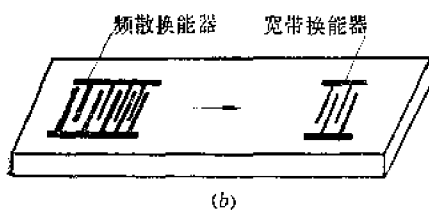
#### 表面声波编码器

surface acoustic wave coder

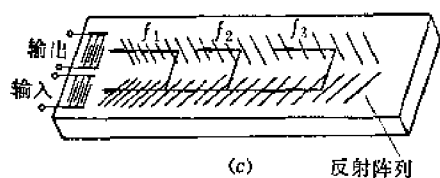
利用表面声波技术可以制成编码器。一个例子如图所示,这是以表面声波抽头延迟线为基础而制成的一种相位编码器。左面是



(a)



(b)



(c)

反射阵列

表面声波脉冲压缩滤波器的几种形式



一种表面声波编码器示意图

发射换能器,它把外加的视频电脉冲,转换为周期数与换能器叉指对数相同的表面声波脉冲。这个声波向右传播而先后被接收换能器的各个抽头转换成电脉冲。表面声波通过相邻抽头线之间的时间恰等于表面声波脉冲的宽度,因此各个电脉冲相互衔接,而在器件的输出端形成宽度与抽头数成正比的长脉冲。抽头中有几个是电极倒转的,因而这几

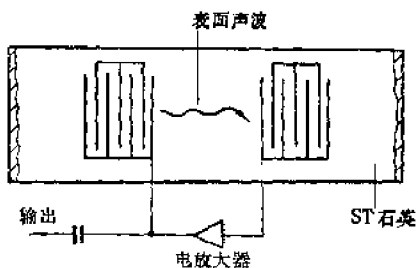


个“单元”脉冲的相位是倒转的。这样就带有信息，构成编码。用二进位的语言就是区别了“0”与“1”。

### 表面声波振荡器

surface acoustic wave oscillator

表面声波振荡器是由一个表面声波元件外加一个放大和反馈电路而组成的高频电振荡器。目前试用的结构之一如图示。这里的表面声波元件看来象一个简单的表面声波延迟线，实际上它一方面利用了表面声波的传播相移，另一方面利用了表面声波换能器的频率特性，这样来比较准确地控制着振荡器的振荡频率。一个关键措施是选取温度系数很小的材料（如 ST 切割石英单晶）作为表面声波元件的基片。



一种表面声波振荡器示意图

表面声波振荡器的主要优点是能在几十兆赫到 1~2 千兆赫的频率范围内工作，而稳定性介于（体声波）石英晶体振荡器与 LC 振荡器之间。表面声波基片的厚度并不决定振荡频率，所以无论振荡器的振荡频率多高，基片厚度总可以达毫米数量级，振荡器可以做得比较结实。和一般的表面声波器件一样，表面声波振荡器易于成批生产。表面声波振荡器还可以进行一定的频率调制。

目前正在研究表面声波谐振器，也可以用来构成振荡器。

### 表面声波放大器

surface acoustic wave amplifier

可以使表面声波直接放大的器件叫做表面声波放大器。这里利用了表面声波同半导体中自由载流子（电子或空穴）的相互作用，

并且是当自由载流子的漂移速度（在外加直流电场的作用下）大于表面声波速度时获得的。

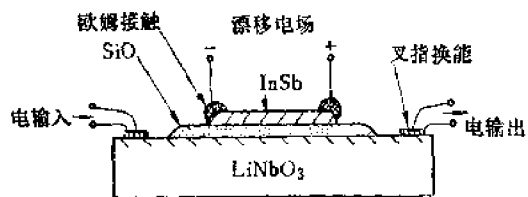
表面声波放大器的主要用途，是在表面声波的传输途中补偿它的传播损耗。表面声波放大器也可以做电信号的放大器，这是把电信号变成声信号，经过放大后，再转换成有一定增益的电信号。

表面声波放大器可以是“结合”介质型的或“分离”介质型的。“结合”和“分离”分别指：传播表面声波的压电介质和具有自由载流子的半导体介质，是合为一体的（即采用如 CdS 等压电半导体材料，既是压电体，又是半导体），还是相互分离的。分离介质型放大器又可分为单片式、条带耦合式等。

### 单片式放大器

monolithic amplifier

表面声波单片式放大器是指做成单片结构的分离介质型放大器。其结构如图示。在表面声波延迟线基片的中间部分，溅射上一层约几百埃厚的一氧化硅或二氧化硅介电薄膜，再在其上镀上一层高迁移率的半导体（如 InSb）结晶薄膜。使用时在半导体膜的两端加直流漂移电场。



单片式放大器结构示意图

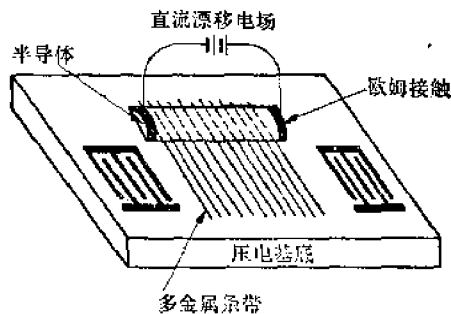
### 条带耦合式放大器

strip coupled amplifier; multistrip amplifier

条带耦合式放大器是一种平面结构的分离介质型放大器。其特点是，表面声波与漂移载流子的耦合是通过横向的多根金属条带

来完成的。其结构如图。

金属条带的作用可见“多条带耦合器”。

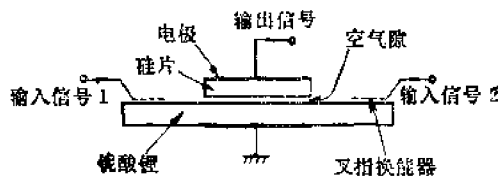


条带耦合式放大器结构示意图

### 表面声波卷积器

surface acoustic wave convolver

表面声波卷积器是利用表面声波的非线性来实时地得出两个电信号的“卷积”信号的器件，如图所示。



表面声波卷积器结构示意图

表面声波卷积器具有表面声波器件共同的一些特色，即体积较小、结构较简单、性能较稳定、可靠等等。此外，表面声波卷积器具有适用于任意的输入信号的特色。

目前在试验几种不同的结构，其中之一如图示。主要的是一块高机电耦合系数的压电基片，例如铌酸锂基片。在这基片中间部分的上方，非常贴近地悬托着一块半导体片（例如硅片）。在基片上表面的两端，各自有一个叉指换能器。把两个待求卷积的电信号分别输入这两个换能器，每个电信号便转换成相应的表面声波信号，各以相反的方向奔向基片上表面的中部，在中部相遇而迭合。表面声波在压电材料的表面会产生交流电场，而这个电场透出到邻近空间，作用到半导体块里的载荷子，从而产生了表面声波的非线性效应。通过这个非线性效应，从半导

体片引出的电信号，便是两个输入电信号的卷积信号（实际上是时间上稍有压缩的卷积信号）。

目前，表面声波卷积器还没有实际使用，还有些待解决的问题。

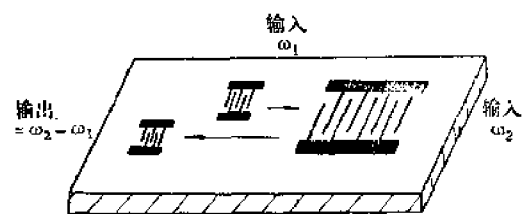
不用表面声波而用体声波，可以同样地根据非线性效应试制卷积器。体声波卷积器的频率范围比表面声波卷积器的大。

### 表面声波相关器

surface acoustic wave correlator

表面声波相关器是利用表面声波非线性来实时地得出两个电信号的“相关”信号的器件。它的原理和结构与表面声波卷积器很相似（见“表面声波卷积器”）。

一种在研究中的结构如图示，这里的非线性是由基片压电材料本身引起的。



表面声波相关器结构示意图

表面声波相关器和表面声波卷积器同样尚处在研究阶段。

### 表面声波移相器

surface acoustic wave phase shifter

表面声波移相器是靠控制表面声波的有关参量来改变输出电信号相对于输入电信号的相位的器件。一般的表面声波器件是先把输入电信号转换成声信号，让声信号在介质表面传播一段距离，然后再把声信号转换成电信号。通常，声信号的声速是固定的，声程长度也是固定的，因而输出电信号的相位相对于输入电信号来说，也是固定的。但如果有办法能控制声信号的声速，或者控制声程长度，或者同时控制二者，就能控制表面声波到达输出换能器时的相位，也就是控制

输出电信号的相位，就是移相。控制表面声波声速的办法之一是在表面声波的传播途中，在贴近介质表面上方的地方放置一块金属片。当改变这块金属片对介质表面的距离时，就能改变片下表面声波的声速。除这个办法外还有一些其它的移相方案。

### 表面声波材料

materials for surface acoustic wave

表面声波材料，主要是指用于换能和用于传声的两种材料。对这两种材料的要求是各不相同的。但在目前大多数的器件中，换能和传声都用同一块材料。通常是用压电材料做为基片，在基片的表面，用集成电路的平面工艺，在适当的位置光刻上两个叉指换能器，一个发射表面声波，一个接收。这样，基片既做换能介质，又做传声介质。基片的材料便应当同时满足两种要求。这样做并不是很理想的，因为要同时满足两种不同的要求，一般说来不会满足得很好。不过目前还是较普遍地这样做，因为按目前的技术水平来说，还是比较方便的。

同时也在探索采用不同的材料分别作为换能和传声之用。例如，在试验将换能用的材料与传声用的材料用粘合剂粘在一起，以制成一个器件。又例如，用非压电材料做为传声介质，而在这材料的部分表面蒸发或溅射一层压电材料的薄膜，作为换能材料。

对换能和传声材料，主要有下列要求：

作为换能材料，要具有压电性，并且根据器件的要求，要有适当的机电耦合系数和声速值（声速值对制作叉指换能器的工艺要求有影响）等。

作为传声介质，一般要求：1）损耗小。单晶体比多晶体损耗小，所以现用材料绝大多数是单晶体；对单晶材料必须适当切割，选取纯波方向，使表面声波的相速与群速方向一致。器件的工作频率较低时，不一定需要单晶材料。2）材料的热膨胀系数和声速温

度系数小。3）有时要求声速小，如延迟线为达到长延迟时间就要求声速小的材料。

上述对换能和传声材料的要求，实际上并不是绝然分开的，它们有些是共同的或互相影响的。

常用的或可用的具体材料有：1）压电体：块状的有石英、铌酸锂、锆酸钡、钽酸锂、铌酸钡钠等等单晶体和锆钛酸铅陶瓷，薄膜的有氧化锌、硫化镉、氮化铝等等。2）非压电材料：硅单晶、蓝宝石单晶、熔融石英、玻璃等等。

某些特殊的表面声波器件，如卷积器、相关器及放大器等等，还要求一些特殊的材料，如半导体或压电半导体：硅、砷化镓、铟化镓及硫化镉、氮化铝等。

### 表面声波机电耦合系数

surface acoustic wave electromechanical coupling coefficient

对于压电材料，表示其转换电能与表面声波能的能力大小的参量，称为表面声波的机电耦合系数。它与体声波的机电耦合系数不是同一个值。对于体声波来说，机电耦合系数的定义、计算和测量方法都是比较成熟的；对于表面声波来说，这方面的分析还不很成熟。通常是与体声波机电耦合系数的某项特征进行类比，来定义表面声波机电耦合系数。

对于体声波而言，可以推算出材料的机电耦合系数的平方，两倍于由电场边界条件的变化而引起的声速的相对变化。与此类似，可以定义表面声波机电耦合系数  $K_s^2$  的平方为

$$K_s^2 = (\text{某个函数}) \times 2 \frac{\Delta v}{v_0}$$

式中  $\Delta v = v_0 - v_m$ ， $v_0$  是材料自由表面上的声速， $v_m$  是材料金属化（蒸发上极薄的金属薄膜）表面上的声速。有的近似计算表明

$$K_s^2 = 2 \left( 1 + \frac{\epsilon_o}{\epsilon_p} \right) \frac{\Delta v}{v_0} \left( 1 - \frac{\Delta v}{v_0} \right)^{-1}$$

式中  $\epsilon_0$ ——自由空间介电常数;

$\epsilon_p$ ——材料的介电常数。

实际测量表明, 表面声波常用的压电材料, 其  $\frac{\Delta v}{v_0}$  都比 1 小很多, 因此, 如果材料的介电常数比自由空间介电常数又大很多时, 则

$$K^2 \approx 2 \frac{\Delta v}{v_0}$$

### 表面声波器件的制造工艺

fabrication techniques for surface acoustic wave devices

表面声波器件的制造工艺, 主要包括: 对于作为器件基片的单晶材料, 进行拉制、定向、切割、研磨、抛光、镀膜等; 为制作叉指换能器, 进行掩膜版的原图刻制、照相制版、光刻、点焊、电匹配、封装。在某些情况下, 还要运用外延生长技术和扩散技术。这些工艺中的某些部分与半导体集成电路的制造工艺是类似的, 目前也借用了后者。

对不少的表面声波器件来说, 工艺上可以着重提出两个较突出的问题, 即制作面积大和制作精度 (包括定位精度和分辨线条的能力) 高。对此可举一例来说明: 假设要制造中心工作频率 60 兆赫、频散带宽 10 兆赫、频散延迟时间 40 微秒、以铌酸锂单晶为基片材料、具有双频散叉指换能器的色散延迟线, 首先需要制备近 20 厘米长的铌酸锂单晶片, 这需要做好拉制、切割、研磨和抛光工作; 其次, 每个叉指换能器可以长达 7 厘米左右, 有两千多根指条, 相邻指宽之差可小于千分之几微米, 这在照相、制版、光刻中, 很小的灰尘颗粒也容易造成电极短路或断指, 从此可见, 超净也是制造表面声波器件中的一个很重要的条件。而且, 为制作高频率的器件, 还要求刻制很细 (例如十分之几微米) 的金属线条。

为提高制造工艺水平, 可采用带有移动工作台的用激光干涉仪控制的扫描电子束光

刻机、离子束轰击蚀刻设备, 以及软 X 光 (~10 埃) 光刻设备等。

### 体声波器件

bulk acoustic wave devices

在固体内部传播的声波称为体声波。目前, 在微波超声领域内, 利用体声波的实用器件, 主要用在电子学中, 对电信号进行延迟、滤波, 对电脉冲进行展宽或压缩, 对电振荡进行稳频等等。体声波器件还可应用在光学中, 另列作“声光器件”。

在电子学的应用中, 和表面声波一样, 体声波的一个重要特点是它的传播速度比电磁波小 5 万到 10 万倍, 因此器件可以做到体积小。

体声波器件, 目前频率可高到 10 千兆赫或稍高些, 相当于微波中的 X 波段。从高频的角度看, 关键问题之一是具备产生和接收声波的换能器以及低损耗的传声介质。高频换能器在目前有加工出薄压电片或覆盖压电膜等形式 (见“体声波换能器”)。低损耗的传声材料有石英、铌酸锂、蓝宝石、金红石、铝酸镁尖晶石、钇铁石榴石、钇铝石榴石等单晶材料。

也有不少应用是在较低频率。例如, 脉冲展宽和压缩用的体声波色散延迟线一般只有几兆赫到几十兆赫。这时, 传声材料可用熔石英、玻璃, 以至金属如钢、铝等。

体声波在半导体中传播时, 可以和半导体中的载荷子相互作用, 导致一些新的效应。这些效应的实际应用还在发展中。

### 体声波换能器

bulk acoustic wave transducer

在低频段, 例如在几兆赫或几十兆赫的频率范围内, 为产生或接收超声, 可以用一般的压电陶瓷片 (如锆钛酸铅陶瓷片) 或压电单晶片 (如石英单晶片)。

在较高频段, 例如在 1~2 百兆赫以上, 便不用陶瓷片而只用单晶片。高频时的一个

关键问题,是怎样把晶片做薄,因为换能一般用单晶片的共振状态,而压电片的共振基频是与片厚成反比的。例如,当片子的基频为5千兆赫时,片子的厚度应小到0.5微米左右。近来发展了离子轰击技术,可以把片子轰薄,把片子基频提到10千兆赫左右。除加工出薄片外,在这里,还要相应解决换能压电片和传声介质间的粘结问题;目前有采用钢粘结、金粘结等工艺。对压电单晶也发展了一些新材料,如 $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{16}$ 等。

另一种制作高频换能器的办法,是在传声介质的端面蒸发上或溅射上压电薄膜,常用的材料有 $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ 等。

另外还在研制特殊结构压电半导体的高频换能器,有耗尽层换能器和扩散层换能器等。在这些结构中,可以比较容易地建立一个薄的共振层,从而可以产生或接收几百兆赫或超过千兆赫的超声。在目前,由于某些缺点,这种类型换能器还没有实际采用,但可能经过改进后有一定用途。

在实验室里,为得到高频微波超声,常用一种非共振的换能器,就是用一根长的石英块,并靠凹腔谐振器在石英块一个端面加上强电场。用这种方法可以产生出高到几万兆赫的超声。

在实验室里,还有一些其它的产生或检测微波超声的方法,其中包括一些利用压电性或磁致伸缩性以外较新机理的方法,例如,利用超导体隧道结,可以产生近 $10^{12}$ 赫的微波超声。

### 体声波延迟线

bulk acoustic wave delay line

体声波延迟线是利用体声波的传播速度比电磁波的传播速度小几万倍这个特性,来延迟电信号到达时间的器件。它由输入换能器、传声介质和输出换能器构成。输入换能器把电信号转换成体声波,在传声介质中传

播,到达输出换能器时,再由输出换能器转换成电信号。

在短时延的情况下,例如对1~2微秒的时延,体声波延迟线目前可以工作在几千兆赫或1万多兆赫。在低频段,时延可以做到相当长,例如,采用“多次反射型块状延迟线”可在几十兆赫的频率延迟几毫秒。

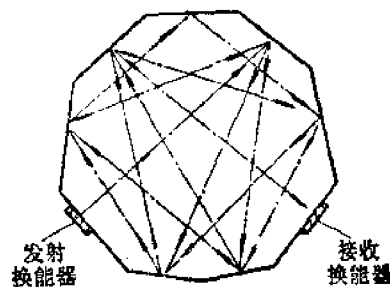
采用比较特殊的设计,体声波延迟线还可以做成频散的,就是说,延迟时间随频率而不同。频散延迟线的一个重要用途,是在雷达中压缩或展宽脉冲。这项应用的体声波频散延迟线有多种形式,如金属带状、金属丝状、楔状、垂直衍射式以及较新的反射阵列型等等。这些形式的频散延迟线都用在较低的频率,绝大多数在50~60兆赫以下。

### 固体块多次反射延迟线

multiple-reflection delay line

固体块多次反射延迟线是一种非频散的固定延迟线。它的特点是利用界面的反射,使体声波在固体块内来回传播,这样可以在较小的体积内,得到较长的延迟时间,如几十、几百或几千微秒。一种结构如图所示。

这种延迟线的特点就是体积小,延迟时间长。已用于雷达、通讯、电视等方面。但也存在带宽较窄等缺点。



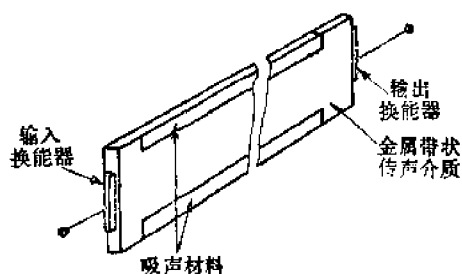
固体块多次反射延迟线结构示意图

### 带状色散延迟线

dispersive strip delay line

用金属薄带做传声介质,在带的两窄边端面用低温焊锡焊上电声换能器,换能器的

另一面焊上导线,做为电信号的输入、输出端,这就是金属带状色散延迟线的基本结构,如图所示。



带状色散延迟线结构示意图

体声波色散延迟线的频散性,基于不同的原理,有两种类型。一种是,信号的各频率分量的传播速度相同,但各自走过长短不同的路径,结果形成频散。另一种是,在限定的频率范围内,信号各频率分量的传播路径同长,而传播速度各自不同,形成频散。带状色散延迟线的频散性,是属于后一种类型。

带状色散延迟线一般采用压电陶瓷换能器。在条带线中所激励的具体的传播模式,主要是通过换能器的极化方式和尺寸来控制的。例如,要激励一次纵波模,一方面要根据换能器中心工作频率和该换能器材料的频率厚度常数确定换能器的厚度,并进行厚度的纵向极化;另一方面,也要选择条带线的厚度和宽度,使厚度等于条带内的声波波长的一半左右,宽度大于约100个带内声波长,以保证满足获得几何频散特性的边界条件。同时还要采取措施,抑制其它模式,减少干扰。并且要尽量防止换能器相对位置的不对称、换能器端面的倾斜、换能器与条带线之间连接层的不均匀及换能器材料的不均匀极化。为了减少声波的反射干扰,应在条带线宽边涂上声吸收材料和做好电负载的匹配。

带状色散延迟线的插入损耗有四个方面:换能损耗、失配损耗、介质传播损耗、波

束散射损耗。

带状色散延迟线的主要优点是频散延迟时间长,延时-频率特性平滑且线性度好,插入损耗较小,结构简单,易于加工制造,成本也较低,所以它做为一种匹配滤波器已较广泛地用于脉冲压缩雷达系统中。也用于通讯等其它方面。

带状色散延迟线的频散带宽较窄(采用不等厚度的金属带,可使带宽得到一定的加宽),延迟温度系数较大,介质损耗随频率增高成四次方增大,工作频率目前还限于50兆赫以下。这些缺点,随着新工艺的出现,将有可能得到一定程度的改善。

### 声电效应

#### acoustoelectric effect

在半导体中,超声与自由载流子(电子或空穴)相互作用,会产生多种效应,如超声的放大或衰减,大振幅超声对半导体电压电流特性的影响,包括电流饱和和电流振荡、声电畴的产生等等,统称为声电效应。

在压电半导体中,超声波和自由载流子的相互作用起因于压电效应;在非压电半导体中,相互作用则是由于形变势耦合。在目前,声电效应基本上都是在压电半导体中进行观察和利用的。它们在Ⅱ-VI化合物(如CdS与ZnO)中比较强,但在Ⅲ-V化合物如GaAs、GaSb、InSb以及元素半导体Te和Se等中也较显著。

### 声电流

#### acoustoelectric current

超声在压电半导体中会产生交变电场,并从而产生自由载流子的空间聚束。这些空间电荷和压电交变电场又相互起非线性的作用,导致一个直流的电流分量,称为声电流。在非压电半导体中,也可以有声电流产生,这时超声与载流子是通过形变势而耦合的。

在压电半导体上外加一个直流电压时,由于自由载流子受电场驱动而漂移,通过半

导体的电流,除声电流以外,还有漂移电流即欧姆电流。当外加直流电压不大,载流子漂移速度小于声速,声波受到衰减时,声电流和欧姆电流是同方向的。提高外加的直流电压,使载流子的漂移速度增加,以至超过声速时,声波得到放大,这时声电流的方向终于倒转,相反于欧姆电流的方向。当半导体内声波放大到足够强时,通过半导体的总电流将发生饱和现象,就是说不再随外加直流电压的提高而增加。

### 声电畴

acoustoelectric domain

在某些压电半导体上外加直流电压,当电压足够大时,由于热噪声的放大、“激震”或其它原因,在半导体内某个区域,可能发展而形成强烈的超声,例如声强为每平方厘米几百、几千瓦的超声。在这个区域内,并会出现很强的直流电场,例如每厘米几万伏的电场。这个区域便叫做声电畴。

在多数情况,这个畴是运动的,并总以大约是声速的速度向阳极移动,且最后在阳极消失。强直流电场的产生及其以声速共同运动,是和强烈的超声密切相关的。超声在压电半导体内会产生交变电场,而强烈的“声包”有可能把自由载流子卷进自己的电场深谷中(在这里形成电荷的高度积聚,在附近便形成电荷的耗尽),并夹持着以声速向前移动。

当半导体内形成这类声电畴时,通过半导体的电流会出现周期性的振荡。

### 声电振荡器

acoustoelectric oscillator

把光导半导体(如较高电阻率的CdS和ZnO)磨成很薄的两面平行的薄片(例如厚度为几十或几百微米),然后在两个面上施加一个直流电压。条件合适时,通过薄片的电流会出现周期性的调制,频率约几百、几千兆赫。这种简单的电振荡器的成因是基于声

电效应,故叫声电振荡器。

薄片加上直流电压后,有可能在片内逐渐激发起多模的超声波。这些声波在片内来回传播,正向时受到放大,反向时受到衰减,但有可能在每一个来回过程中得到纯放大增益。这时声波会逐渐增强,它的频谱也会逐渐改变,在最后可能只剩下几个简单的模式。通过薄片的电流便是受这些影响而发生振荡的。

薄片结构实际上形成一个声共振器,而由于器内还有放大作用,这种声电振荡器在一定意义上可以看作声学里的激光器。激光器的某些现象会出现在声电振荡器内,例如锁模现象。

### 声光效应

acousto-optic effect

当声波在透明介质(固体或液体)中传播时,声波引起的形变将使介质的密度产生周期性的疏密变化,相应地使介质的折射率也产生周期性的变化,其空间周期等于声波波长。如果有单色光投射进入这种介质,则因介质内部折射率的周期性改变,将使光线路径产生变化,这种现象称为声光效应。当声波频率比较低,且光束宽度比声波波长小时,介质折射率的空间变化,使光线产生偏转或聚焦作用;当声波频率比较高,且光束宽度比声波波长大很多时,这种折射率的周期变化,起着位相光栅的作用,使通过的光线产生衍射。

就声光衍射而言,依实验条件的不同,或者产生多级衍射光谱(称为拉曼-纳斯衍射或德拜-谢尔斯衍射);或者主要产生强的一级衍射光(称为布拉格衍射)。此时光束发生偏转、频移和强度变化。声光效应的应用就是利用衍射光束的这些性质来实现光束的调制。

利用体声波产生的声光效应已制成多种声光器件,如声光偏转器,声光Q开关及声

光腔倒空等,广泛地应用于光电子学技术、光信息处理技术等等领域。声光效应也可用在超声成象及用来研究声波的传播规律。此外,又可利用声光效应对物质的弹性性质、弹光性质、磁弹性质和磁光性质等进行较深入的研究。

目前,由表面声波产生的声光效应正逐步引起注意,并且有可能应用于光集成技术。

### 拉曼-纳斯衍射

Raman-Nath diffraction

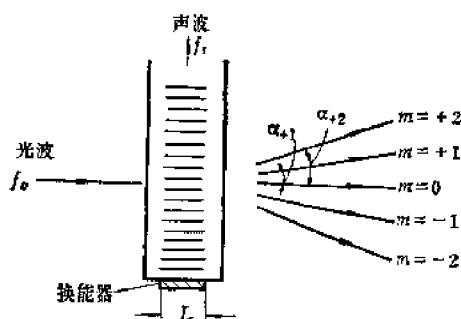
在声光相互作用的情况下,当声波波长比较长,即频率较低,而光通过声波的相互作用距离 $L$ 满足

$$L \ll \Lambda^2 / \lambda$$

式中  $\Lambda$ ——声波波长;

$\lambda$ ——光波波长。

这时,如果光线与声传播方向垂直且通过介质,则在中央出射光点的两侧会对称地出现衍射谱,称为拉曼-纳斯衍射,如图。



拉曼-纳斯衍射

第 $m$ 级衍射谱的偏转角 $\alpha_m$ 满足

$$\Lambda \sin \alpha_m = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

第 $m$ 级衍射光谱的频率 $f_m$ 满足

$$f_m = (f_0 \pm m f_s) \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

式中  $f_0$ ——光波频率;

$f_s$ ——声波频率。

第 $m$ 级衍射光强 $I_m$ 满足

$$I_m / I_0 = J_m^2 \left( \frac{2\pi L \cdot \Delta n}{\lambda} \right)$$

式中  $I_0$ ——入射光强;

$J_m$ ——第 $m$ 级贝塞尔函数;

$\Delta n$ ——声波引起的介质折射率的变化值。

以上计算是对声行波而言,对于声驻波,上述公式需做适当的修正。

如果光线与声传播方向不完全垂直,则出现的衍射谱将是不对称的。

### 布拉格衍射

Bragg diffraction

在声光相互作用的情况下,当声波波长比较短,即频率较高,而光通过声波的相互作用距离 $L$ 满足

$$L \gg \Lambda^2 / \lambda$$

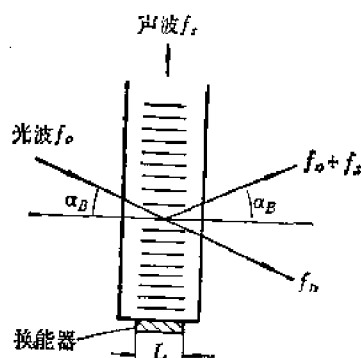
式中  $\Lambda$ ——声波波长;

$\lambda$ ——光波波长。

这时,只有当光线以倾斜角度通过声波,并且光线通过的方向与声波波阵面之间的夹角 $\alpha_B$ 满足

$$\Lambda \sin \alpha_B = \frac{\lambda}{2}$$

时,在非偏转的出射光线的一侧,才能出现一级强衍射光,一级衍射光与声波波阵面之间的夹角也是 $\alpha_B$ ,如图示,因此 $\alpha_B$ 称为布



布拉格衍射

拉格衍射角。第一级衍射光与投射光相对于声波波阵面来说仿佛镜式反射。第一级衍射光的频率 $f_B$ 满足

$$f_B = f_0 \pm f_s$$

式中  $f_0$ ——光波频率;

$f_s$ ——声波频率。



第一级衍射光强  $I_1$ , 满足

$$I_1/I_0 = \frac{\pi^2}{2} M_2 \frac{I_a L^2}{\lambda_0^2 \cos^2 \alpha_B}$$

式中  $I_0$ ——入射光强;

$I_a$ ——声强;

$M_2$ ——声光介质的性能指数;

$\lambda_0$ ——真空中的光波波长。

### 声光调制器

acousto-optic modulator

利用声光效应使通过声光介质的光按某一规律变化, 叫做声光调制。根据这种原理制成的器件, 叫做声光调制器。例如, 改变超声场强度可以改变衍射光的强度, 对光进行强度调制, 这种光调制器件, 叫做声光光强度调制器。

声光调制器随应用之不同而有多种, 除光强度调制器以外, 还有光偏转器、光扫描器、激光Q开关等。

声光调制器共同的特点是: 驱动功率小、调制度深、消光比高、体积小、工作稳定等。其应用范围正在日益扩大。

### 声光偏转器

acousto-optic deflector

利用声光效应来改变通过声光介质的光的传播方向, 叫做声光偏转。根据这种原理制成的器件, 叫做声光偏转器。利用这种偏转器, 只要改变所加超声波的频率, 就可以改变光偏转角的大小。

声光偏转器可用于激光显示, 还可用在电子计算机中作光存贮器, 存贮容量大。

声光偏转器具有体积小、驱动功率低、装置简单、偏转效率高、工作稳定等特点。

声光偏转器的主要参数有三个:

1. 可分辨点的数目  $N$ ;

$$N = \frac{\Delta\alpha}{\delta\theta}$$

式中  $\Delta\alpha$ ——相应于声振荡带宽  $\Delta f$  的偏转角;

$\delta\theta$ ——光束发散角。

2. 随机存贮时间 (声波渡越光束时间)

$\tau_1$

$$\tau = \frac{w}{v}$$

式中  $w$ ——光束宽度;

$v$ ——声光介质中的声速。

3. 偏转效率  $\eta$ ;

$$\eta = \frac{I}{I_0}$$

式中  $I$ ——衍射光强度;

$I_0$ ——入射光强度。

### 声光腔倒空

acousto-optic cavity-dumping

在激光器中, 用突然改变耦合输出的方法, 使贮在高Q谐振腔已建立起稳定振荡的光能量, 在一极短时间内以巨脉冲形式从谐振腔内倾倒出去, 叫腔倒空或叫倾腔输出。利用声光效应实现腔倒空的技术, 叫声光腔倒空, 有时又叫声光内腔调制。

声光腔倒空是用于连续泵浦激光器以获得高重复率、高效率、高峰值功率的一种方法。

### 声光介质

acousto-optic medium

声光介质是指具有声光效应的介质。不同的声光介质有不同的声光效果, 决定介质这个效果的主要指标是介质的声光性能指数和声吸收系数。优良的声光介质要求声光性能指数高和声吸收系数小, 但这二者往往不能兼得。可用的声光介质有很多, 例如钽酸铅、氧化碲、钨酸碲等单晶, 以及熔融石英、特种玻璃及水等。

### 磁弹耦合

magnetoelastic coupling

见“磁声耦合”, 以及“磁性材料”章的“磁弹耦合效应”。

## 磁声耦合

magnetoacoustic coupling

磁性介质中可以产生和传播一种纯粹磁性的磁矩进动波,一般称为自旋波。自旋波是高度频散的,它的相速度可以从电磁波的相速度改变到声波的相速度或更低;对于给定的磁性介质来说,自旋波的相速度取决于外加磁场的大小。当外加磁场适当,自旋波的频率与波长接近于介质中声波的频率与波长时,由于磁弹耦合效应,磁矩的波动会导致晶格的波动,也就是产生声波。反过来,磁性介质中传播的声波,在外加磁场适当时,也可以激发自旋波。这种自旋波与声波的相互耦合,称为磁声耦合,有时也通称为磁弹耦合。

## 磁弹波

magnetoelastic wave

磁介质中的自旋波,在磁声耦合强的区域内,传播时不仅有磁矩排列方向的交替变化,而且同时伴随有原子或离子的位移周期变化,即含有声波成份。这种波动是磁波和声波的混合波,称为磁弹波。发生磁弹波的强磁声耦合区域,在自旋波频散曲线和声波频散曲线的交点的附近,在这里,两种波的频率和波长都相近。

相应地,磁介质中传播的声波,在适当的条件下,主要是在适当的外加磁场下,也会转换为磁弹波。

在一定条件下,磁弹波可以束缚在磁介质的表面而传播,成为表面磁弹波。

## 磁弹波延迟线

magnetoelastic delay line

磁介质中的磁弹波是一种慢波,其传播速度相近于介质中声波的传播速度,比电磁波速度要低四、五个数量级。因此利用磁弹波可以延迟电信号。磁弹波的传播速度可以用外加磁场来控制,因此,这类延迟线又是延迟时间可调的。磁弹波是频散的,所以一方面可以采取措,做成基本上非频散的延迟线,一方面可以利用其频散性,以制作雷达中脉冲压缩用的色散延迟线。目前最常用的磁性材料是低损耗的钇铁石榴石单晶,例如在这种材料中可以做到中心频率为几千兆赫时有几微秒的延迟。

磁弹波延迟线的较简单结构是用一根棒形钇铁石榴石单晶,外加沿棒轴的一个可变电静磁场。用一个耦合线把高频电磁波转换为自旋波,随而转换为磁弹波。在波传播一段距离后,再用同一个或另一个耦合线把能量转换为电磁波的形式引导出来。另有一些比较复杂的结构,例如,为了提高电输出和电输入的隔离,可以采用两段钇铁石榴石单晶,中间粘上一段钇铝石榴石单晶的传播介质。也可以用超声换能器送进高频超声,再激发自旋波。又例如,为了尽可能消除频散,可在传播介质的周围附加磁化材料,等等。

## 声法拉第旋转

acoustic Faraday rotation

线偏振切变声波在磁介质中沿磁场方向传播时,由于线偏振波可以分解为两支反向旋转的圆偏振波,而由于声波与自旋波的相互作用,右旋波的传播速度比左旋波的要低一些,结果是合成波的偏振面发生旋转,称为声法拉第旋转。

## 英 文 索 引

- | A   | 页码    |                                      | 页码    |
|---|-------|--------------------------------------|-------|
| abrasive                                  | 30-18 | amplitude hologram                   | 30-41 |
| abrasive suspension                       | 30-19 | amplitude modulation type ultrasonic |       |
| acoustic admittance                       | 30-4  | diagnostic equipment                 | 30-37 |
| acoustic cavitation                       | 30-16 | amplitude transformer                | 30-13 |
| acoustic coupling                         | 30-4  | angle beam testing method            | 30-34 |
| acoustic emission                         | 30-32 | angle probe                          | 30-25 |
| acoustic emission amplitude               | 30-33 | anisotropic (sound bearing) medium   | 30-2  |
| acoustic emission comutative counts       | 30-32 | apodized transducer                  | 30-48 |
| acoustic emission detection system        | 30-34 | area factor                          | 30-14 |
| acoustic emission event                   | 30-32 | artificial defect                    | 30-31 |
| acoustic emission monitoring system       | 30-35 | A-scope                              | 30-29 |
| acoustic emission rate                    | 30-32 | attenuation of sound                 | 30-3  |
| acoustic emission signal                  | 30-33 | AVG (DGS) diagram                    | 30-31 |
| acoustic emission source                  | 30-33 | automatic alarm                      | 30-27 |
| acoustic emission spectrum                | 30-33 | automatic flaw detection             | 30-25 |
| acoustic Farady rotation                  | 30-63 |                                      |       |
| acoustic head                             | 30-20 | <b>B</b>                             |       |
| acoustic load                             | 30-4  | bidirectional transducer             | 30-47 |
| acoustical hologram                       | 30-41 | biological effect of ultrasound      | 30-16 |
| acoustical holography                     | 30-41 | blocked admittance                   | 30-12 |
| acoustical holography by electronbeam     |       | blocked impedance                    | 30-12 |
| scanning                                  | 30-42 | bonding tool                         | 30-20 |
| acoustical holography by laser scanning   | 30-42 | bottom echo                          | 30-30 |
| acoustical holography by mechanical       |       | boundary echo                        | 30-31 |
| scanning                                  | 30-42 | BP-scope                             | 30-30 |
| acoustical holography with detector array | 30-42 | Bragg diffraction                    | 30-61 |
| acoustical image aberration               | 30-43 | B-scope                              | 30-30 |
| acoustical image converter                | 30-43 | bulk acoustic wave delay line        | 30-58 |
| acoustical imaging                        | 30-39 | bulk acoustic wave devices           | 30-57 |
| acoustical imaging by Bragg diffraction   | 30-43 | bulk acoustic wave transducer        | 30-57 |
| acoustical impedance method               | 30-23 | bulk wave                            | 30-5  |
| acoustical lens                           | 30-44 | burst emission                       | 30-33 |
| acoustoelectric current                   | 30-59 |                                      |       |
| acoustoelectric domain                    | 30-60 | <b>C</b>                             |       |
| acoustoelectric effect                    | 30-59 | catenary horn                        | 30-15 |
| acoustoelectric oscillator                | 30-60 | cavitation bubble                    | 30-16 |
| acoustoelectrical wave (B-G wave)         | 30-7  | cavitation nuclei                    | 30-16 |
| acousto-optic cavity-dumping              | 30-62 | cavitation threshold                 | 30-16 |
| acousto-optic deflector                   | 30-62 | chemical effect of ultrasound        | 30-16 |
| acousto-optic effect                      | 30-60 | complex horn                         | 30-15 |
| acousto-optic medium                      | 30-62 | compound scope                       | 30-30 |
| acousto-optic modulator                   | 30-62 | concentrator                         | 30-13 |
| admittance circle                         | 30-12 | conical horn                         | 30-14 |
|   |       | conjugate image                      | 30-41 |

continuous emission 30-33  
couplant 30-28  
coupling bar 30-15  
critical angle 30-4  
crossed-field model 30-50  
curve of acoustic emission rate 30-33

## D

dispersive strip delay line 30-58  
dead zone 30-28  
delayed echo 30-31  
delta testing method 30-24  
depth compensation 30-28  
dilatational wave 30-6  
direct amplification of ultrasound 30-8  
direct contact method 30-24  
directivity 30-4  
dispersive (sound bearing) medium 30-3  
dispersive transducer 30-47  
distance amplitude compensation (DAC) 30-28  
distortional wave 30-6  
Doppler effect 30-5  
double crystal probe 30-26  
double direction detection 30-23  
double electrode transducer 30-47  
double probe testing method 30-23  
dummy electrode 30-49

## E

echogram 30-30  
effect of ultrasound 30-16  
electrical effect of ultrasound 30-16  
electro-acoustical analogy 30-4  
electro-acoustical efficiency 30-12  
electro-mechanical analogy 30-4  
electro-mechanical efficiency 30-12  
electrostatic transducer 30-11  
emission site location 30-34  
equivalent circuit model 30-49  
exponential horn 30-14

## F

fabrication techniques for surface acoustic  
wave devices 30-57  
feed-back transducer 30-12  
feed-back wafer 30-12  
first critical angle 30-4  
flaw detection sensitivity 30-27  
flaw echo 30-30  
flexural wave 30-6

focusing probe 30-26  
Fourier type horn 30-15  
 $\delta$ -function model 30-50

## G

ghost echo 30-31  
Goussian horn 30-15  
group velocity 30-3

## H

half-angle of spread 30-4  
honey-comb structure transducer 30-10  
horn 30-13  
hydrodynamic transducer 30-13

## I

immersion method 30-24  
immersion transducer 30-10  
immersion probe 30-26  
impedance circle 30-12  
impulse response model 30-50  
in-line model 30-50  
interdigital transducer 30-46  
interface echo 30-31  
isotropic (sound bearing) medium 30-2

## K

Kaiser effect 30-34

## L

Lamb wave 30-6  
laminated transducer 30-10  
leaky surface wave 30-7  
length extension vibration 30-5  
light effect of ultrasound 30-16  
liquid-filled acoustical lens 30-44  
liquid surface acoustical holography 30-41  
longitudinal distortion 30-43  
longitudinal resolution 30-28  
longitudinal wave 30-6  
longitudinal wave testing method 30-24  
longitudinal wave velocity in a thin bar 30-3  
longitudinal wave velocity in an infinite  
solid medium 30-9  
Love wave 30-7

## M

magnetizing current 30-11  
magnetoacoustic coupling 30-62



sound velocity	30-3	ultrasonic cleaning	30-17
spurious echo	30-31	ultrasonic coagulation	30-20
standard test block (STB)	30-31	ultrasonic cutting	30-18
static admittance	30-12	ultrasonic diagnosis	30-36
static impedance	30-12	ultrasonic dispersion	30-20
stepped horn	30-14	ultrasonic Doppler method diagnostic equipment	30-38
Stoneley wave	30-7	ultrasonic Doppler method testing system	30-27
strip coupled amplifier	30-54	ultrasonic drilling	30-18
surface acoustic wave	30-5	ultrasonic-electrical spark associated machining	30-18
surface acoustic wave amplifier	30-54	ultrasonic-electrolytic associated machining	30-18
surface acoustic wave band-pass filter	30-52	ultrasonic electroplating	30-21
surface acoustic wave coder	30-53	ultrasonic emulsification	30-21
surface acoustic wave convolver	30-55	ultrasonic extraction	30-20
surface acoustic wave correlator	30-55	ultrasonic fatigue testing	30-21
surface acoustic wave electromechanical coupling coefficient	30-56	ultrasonic flaw detection	30-22
surface acoustic wave filter	30-52	ultrasonic flaw detector	30-27
surface acoustic wave oscillator	30-54	ultrasonic -frequency power supply	30-8
surface acoustic wave phase shifter	30-55	ultrasonic -frequency rotary generator	30-9
surface acoustic wave pulse compression filter	30-52	ultrasonic generator	30-8
surface acoustic wave techniques	30-45	ultrasonic generator with frequency automatic control	30-9
surface acoustic wave transducer	30-46	ultrasonic grinding	30-18
surface acoustic waveguide	30-51	ultrasonic hardness measurement	30-35
surface wave probe	30-28	ultrasonic immersing	30-21
surface wave testing method	30-24	ultrasonic inspection and measurement	30-22
<b>T</b>		ultrasonic liquid-level measurement	30-36
test surface	30-29	ultrasonic liquid-flow measurement	30-36
thermal effect of ultrasound	30-16	ultrasonic machining	30-17
thin film waveguide	30-51	ultrasonic -mechanical associated machining	30-18
tilted transducer	30-49	ultrasonic medicine	30-36
topographic waveguide	30-51	ultrasonic metal forming	30-21
torsional vibration	30-5	ultrasonic metallurgy	30-20
torsional wave	30-6	ultrasonic microscope	30-43
transducer input admittance	30-12	ultrasonic multi-spot welding	30-19
transducer input impedance	30-12	ultrasonic peak-welding	30-20
transmission method	30-23	ultrasonic power meter	30-15
transmitted pulse	30-30	ultrasonic processing	30-9
transverse resolution	30-28	ultrasonic ring welding	30-19
transverse wave	30-6	ultrasonic seam welding	30-19
transverse wave testing method	30-24	ultrasonic seed irradiation	30-21
triple transit echo	30-51	ultrasonic sewing	30-20
triple travel signal	30-51	ultrasonic soldering	30-20
<b>U</b>		ultrasonic spot welding	30-19
ultrasonic atomization	30-21	ultrasonic surgery	30-37
ultrasonic bonding	30-19	ultrasonic temperature measurement	30-36
ultrasonic brazing	30-20	ultrasonic therapy	30-37
ultrasonic camera	30-43	ultrasonic therapy equipment	30-38
ultrasonic cardiogram	30-30	ultrasonic-thermocompression welding	30-20
ultrasonic cardiogram equipment	30-38	ultrasonic thickness measurement	30-35

ultrasonic tomography equipment	30—38	vibration pickup	30—11
ultrasonic transducer	30—9	video-frequency presentation (VF presentation)	30—29
ultrasonic vibration system	30—15	volume dilatational vibration	30—5
ultrasonic viscosity measurement	30—36	vortex whistle	30—13
ultrasonic welding	30—19		
ultrasonogram	30—30		
ultrasound	30—1		
unidirectional transducer	30—47		
<b>V</b>			
variable angle probe	30—26		
vibration mode	30—5		
		<b>W</b>	
		wedge wave	30—7
		weighted transducer	30—48
		wheel type probe	30—26
		wideband transducer	30—47